

10/2011

Graphische Modellierung und Systematisierung realer Restmüllentsorgungsprozesse

Daniel Miofsky, Rainer Souren

Ilmenauer Schriften zur
Betriebswirtschaftslehre

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übertragung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, bleiben vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© VERLAG proWiWi e. V., Ilmenau, 2011

Ilmenauer Schriften zur Betriebswirtschaftslehre
www.tu-ilmenau.de/is-www

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Norbert Bach, Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Gernot Brähler,
PD Dr. rer. pol. David Müller, Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Rainer Souren

ISSN 2192-4643

ISBN 978-3-940882-35-6

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011200579

Ilmenauer Schriften zur
Betriebswirtschaftslehre
10/2011

Graphische Modellierung und Systematisierung realer
Restmüllentsorgungsprozesse

Daniel Miofsky¹, Rainer Souren²

¹ Dipl.-Kfm. Daniel Miofsky, Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachgebiets
Produktionswirtschaft/Industriebetriebslehre an der TU Ilmenau

² Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Rainer Souren,
Leiter des Fachgebiets Produktionswirtschaft/Industriebetriebslehre an der TU Ilmenau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Sequenzielle Analyse elementarer Entsorgungsprozesse des Restmülls.....	2
2.1 Methodik und Eingrenzung der Untersuchung	2
2.2 Identifikation der Hauptentsorgungsprozesse.....	3
2.3 Sammlung und Transport der Restabfälle	4
2.3.1 Fahrt in das Entsorgungsgebiet und Behälterbereitstellung	4
2.3.2 Behälterentleerung und Transport zur Müllverbrennungsanlage.....	8
2.3.3 Behälterrückstellung und Fahrt zum Betriebshof.....	10
2.4 Thermische Behandlung der Restabfälle	13
2.4.1 Annahme und Lagerung	13
2.4.2 Verbrennung und Dampferzeugung	14
2.4.3 Rauchgasreinigung	16
3 Typologie der Entsorgungsprozesse.....	20
3.1 Konzeptionelle Vorüberlegungen	20
3.2 Produktionstechnische Typologie von Entsorgungsprozessen.....	21
3.3 Produktionswirtschaftliche Typologie von Entsorgungsprozessen.....	25
4 Resümee	30
Anhang A1	33
Anhang A2	34
Literaturverzeichnis	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Überblick über die Hauptentsorgungsprozesse.....	3
Abbildung 2-2: Fahrt in die Stadt.....	5
Abbildung 2-3: Bereitstellung der Abfallbehälter	7
Abbildung 2-4: Restmüllumschlag auf das Sammelfahrzeug.....	8
Abbildung 2-5: Restmülltransport zur Müllverbrennungsanlage.....	10
Abbildung 2-6: Rückstellen der geleerten Behälter.....	11
Abbildung 2-7: Rückfahrt zum Betriebshof.....	12
Abbildung 2-8: Vermischung und Lagerung der Abfälle	14
Abbildung 2-9: Verbrennung und Dampferzeugung.	15
Abbildung 2-10: Rauchgasreinigung	17
Abbildung A-1: Verbrennung und Dampferzeugung (vergrößerte Darstellung).....	33
Abbildung A-2: Rauchgasreinigung (vergrößerte Darstellung).....	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Produktionstechnische Typologie von Entsorgungsprozessen.....	22
Tabelle 3-2: Produktionswirtschaftliche (Entsorgungs-)Prozesstypologie.....	25

Abkürzungsverzeichnis

AbG	Abgas	MGB _{1100,B}	Müllgroßbehälter, 1100 Liter, befüllt
AbP	Abprodukte		
AdS	Adsorbens	MGB _{1100,U}	Müllgroßbehälter, 1100 Liter, unbefüllt
AkK	Aktivkohle		
BImSchV	Bundesimmissions- schutzverordnung	MGB _{120,B}	Müllgroßbehälter 120 Liter, befüllt
BrS	Brennstoff	MGB _{120,L}	Müllgroßbehälter, 120 Liter, unbefüllt
BrW	Brauchwasser	MVA	Müllverbrennungsanlage
d	Tag	NaCl	Natriumchlorid
DFG	Deutsche Forschungsgemein- schaft	NaOH	Natriumhydroxid
DXB	Dioxb	NbP	Nebenprodukte
eIS	elektrischer Strom	NH ₃	Ammoniak
ESt	Einsatzstoffe	NH ₄ OH	Ammoniumhydroxid
etW	enthärtetes Wasser	ÖRE	öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
FAR	Fahrer	P	Prozess
FrD	Frischdampf	PrD	Prozessdampf
FrL	Frischluf	QuW	Quenchwasser
GRST	Grundstück	REA	Salz und Stäube
GwA	Gewerbeabfall	Rd	Redukt
h	Stunde	RG	Rauchgas
HCl	Chlorwasserstoff	RhG	Rohgas
HF	Fluorwasserstoffsäure	RM	Restmüll
Höl	Heizöl	RnG	Reingas
KA	Kesselasche	s	Sekunde
KaM	Kalkmilch	S _{B,T}	Sammelfahrzeug, befüllt, teilbesetzt
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts-/ Abfallgesetz	S _{U,T}	Sammelfahrzeug, unbefüllt, teilbesetzt
LAD	Lader		
MBA	Mechanisch-Biologische Anlage	S _{U,U}	Sammelfahrzeug, unbefüllt, unbesetzt

S _{u,v}	Sammelfahrzeug, unbefüllt, voll besetzt
Slk	Schlacke
SO ₂	Schwefeldioxid
SpM	Sperrmüll
SpW	Speisewasser
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
ÜPF	Überlassungspflichtige(r)
WaW	Waschwasser

1 Einleitung

Inwieweit kann und muss die bestehende Produktionstheorie erweitert werden, um sämtliche unternehmenseigene Interessen, aber auch die seiner Stakeholder vollumfänglich zu erfassen, abzubilden und die Entscheidungen danach auszurichten?

Dieser Frage gehen seit Anfang 2011 im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierten Projekts zum Thema „Wertschöpfungstheorie betrieblicher Entsorgungsprozesse“ das Fachgebiet Produktionswirtschaft/Industriebetriebslehre der TU Ilmenau und der Lehrstuhl für Unternehmenstheorie der RWTH Aachen nach.¹ Vorrangiges Ziel ist es, für kommunale Entsorgungs(dienst)leistungen alle Präferenzen der am Entsorgungsprozess beteiligten Akteure zu erfassen und somit in Erweiterung der herkömmlichen Produktions- und Kostentheorie abzubilden, was über die quantitative Erfassung und monetäre Bewertung der Objektflüsse hinausgeht. Darauf aufbauend soll ein Kennzahlensystem entwickelt werden, das die unternehmensinterne, operative Planung und Steuerung der Prozesse unterstützt und letztlich zu Entscheidungen führt, die alle Ansprüche der beteiligten Akteure berücksichtigt.

Da der Startpunkt jedweder Weiterentwicklung die Erfassung des aktuellen Zustandes erfordert, ist im Rahmen des Projekts zunächst eine Prozesserhebung kommunaler Entsorgungsbetriebe durchzuführen. Ziel dieses Arbeitsberichtes ist es daher, die realen Prozesse der Restabfallentsorgung zu analysieren und mithilfe bekannter produktionswirtschaftlicher Modelle (Input/Output-Graphen) abzubilden. Dazu wurden für die verschiedenen Teilprozesse Betriebe kommunale Projektpartner besucht und deren Prozesse strukturell und quantitativ erhoben. Darüber hinaus sollen auf Basis bestehender Prozesssystematiken eine entsorgungsprozessspezifische Typologie aus technologischer und ökonomischer Sicht abgeleitet und die analysierten Prozesse anschließend dort eingeordnet werden.

In Kapitel 2 wird zunächst die sequenzielle Analyse der Entsorgungsprozesse vorgestellt, wobei auf den Sammlungs- und Transportprozess (am Beispiel des Stadtbetriebs Aachen) sowie den thermischen Behandlungsprozess (am Beispiel der MVA Bonn) fokussiert wird. Die Untersuchung basiert auf der graphischen Darstellung der Input/Output-Beziehungen wesentlicher Transformationen und liefert ein umfassendes Bild hinsichtlich der ablaufenden Prozesse sowie der beteiligten Akteure und Objekte. Kapitel 3 widmet sich der Identifizierung von Systematisierungskriterien entsorgungsrelevanter Prozesse aus produktionstechnischer und produktionswirtschaftlicher Sicht, die jeweils in eine Gesamttypologie überführt und durch die beispielhafte Zuordnung der identifizierten Teilprozesse aus der vorangegangenen Analyse der Restmüllentsorgung ergänzt werden. Abschließend fasst Kapitel 4 die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und gibt einen kurzen Ausblick auf zukünftige Ziele und Schritte, die im Rahmen des DFG-Projekts folgen.

¹ Vgl. Deutsche Forschungsgemeinschaft (gepris.dfg.de), Abrufdatum: 06.10.2011.

2 Sequenzielle Analyse elementarer Entsorgungsprozesse des Restmülls

Auf der Grundlage einer Realerhebung zeigt Kapitel 2 im Folgenden eine Prozessanalyse für die Entsorgung von Restmüll auf, wobei der Fokus auf den Kollektions- und Reduktionsprozessen liegt.²

2.1 Methodik und Eingrenzung der Untersuchung

Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, entscheidungsrelevante Teilprozesse zu identifizieren und die damit verbundenen Transformationen sowie wichtige Akteure und Objekte darzustellen. Die Erhebung wurde beim Stadtbetrieb Aachen für die Prozesse der Restmüllabfuhr und bei der Müllverwertungsanlage Bonn für die Restmüllverbrennung durchgeführt; dabei stand zunächst die Erfassung der Prozessstrukturen im Vordergrund. Zum besseren Verständnis wurden darüber hinaus die Einsatz- bzw. Ausbringungsquantitäten empirisch erfasst, die zum großen Teil auf Jahres-, Wochen- oder Tagesdurchschnittswerten beruhen,³ und auch die Prozesszeiten wurden auf diese Weise ermittelt.

Als Analyserahmen nachfolgender Untersuchung dient die (graphische) Aktivitätsanalyse, die relevante Aktivitäten und Objekte mithilfe von Input/Output-Graphen abbildet. I/O-Graphen werden konstruiert, indem Objekt- und Prozessknoten, die wahlweise durch Kreise und Ellipsen bzw. Quadrate und Rechtecke symbolisiert werden, (abwechselnd) mittels Pfeilen miteinander verbunden werden. Sie bieten sich als Darstellungsform vor allem in solchen Fällen an, in denen quantitative Aussagen von nachrangiger Bedeutung sind bzw. wenn, wie im vorliegenden Fall, die innere Struktur eines Produktionssystems und/oder seine institutionelle Außenverflechtung im Fokus der Untersuchung stehen. Aus der Struktur der Graphen können gleichwohl auch mathematische Gleichungssysteme abgeleitet werden, mit denen sich z. B. Modelle der (linearen) Optimierung erstellen lassen.

Da sich die Untersuchung nur auf die Entsorgung von Restmüll bezieht und andere Entsorgungsaufgaben des Entsorgungsträgers bewusst ausgeblendet werden, seien zur eindeutigen Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes die Begriffe *Restmüll* und *Restmüllentsorgungsprozess* wie folgt definiert:

² Ausgeblendet werden somit die Induktionsprozesse, im Speziellen die Ablagerung des Restmülls. Vgl. zu den verschiedenen Transformationsphasen im Stoffkreislauf Souren 2003, S. 97f.

³ Insofern unterstellen die dargestellten Werte einen linearen Zusammenhang zwischen Input und Output, der in der Realität aber kaum gegeben sein dürfte. Auf die Ableitung eines realistischeren funktionalen Zusammenhangs wurde dennoch verzichtet, da in diesem Bericht die Strukturen im Vordergrund stehen sollen.

- Unter **Restmüll** werden diejenigen Komponenten privaten Hausmülls verstanden, die von der Erfassung vorgeschalteter Sammel- und Verwertungssysteme (für Wert- und Schadstoffe) ausgeschlossen sind und in der Folge gemäß § 13 Abs. 1 KrW-/AbfG unter kommunaler Obhut entsorgt werden müssen.⁴
- Unter **Restmüllentsorgungsprozessen** werden sämtliche betriebliche Aktivitäten verstanden, deren Ziel in der Kollektion, Verwertung oder Beseitigung von Restmüll liegt.

2.2 Identifikation der Hauptentsorgungsprozesse

Der Untersuchungsfortgang richtet sich im Folgenden nach den typischen Prozessschritten der Restmüllentsorgung und ist in Abbildung 2-1 überblicksartig dargestellt. Der Prozess beginnt mit der **Einsammlung und dem Transport** des Restmülls [RM] überlassungspflichtiger Bürger zur Müllverbrennungsanlage und ist als Prozess 1 „Sammlung und Transport“ abgebildet. Die dazugehörigen Unterprozesse werden in Abschnitt 2.3 ausführlich beschrieben.

Dem schließt sich als Prozess 2 die **Behandlung** der Abfälle in der Müllverwertungsanlage an. Als Behandlungsart wird die thermische Verwertung beschrieben, die neben dem eigentlichen Verbrennungsprozess von Restmüll [RM] und weiterer Redukte [Rd] wie Sperr- oder Gewerbemüll die Dampferzeugung sowie anschließende Rauchgasreinigung unter Einsatz weiterer Einsatzstoffe [ESt] enthält. Output der Reduktion sind Abprodukte [AbP] wie Schlacke oder schadstoffhaltige Abgase, aber auch nutzbare Nebenprodukte [NbP] wie z. B. Prozessdampf. Die detaillierte Darstellung beteiligter Prozesse erfolgt in Abschnitt 2.4.

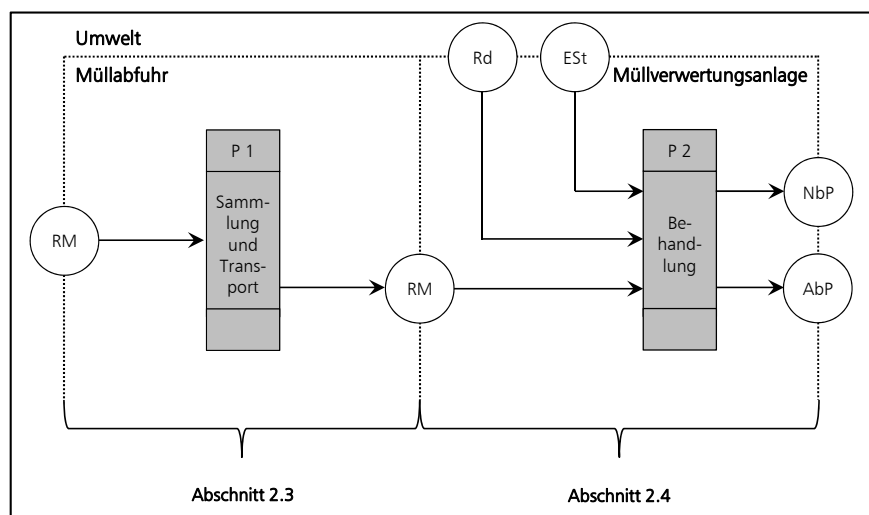


Abbildung 2-1: Überblick über die Hauptentsorgungsprozesse

Der Behandlung schließt sich für gewöhnlich die **Ablagerung angefallener Abprodukte** an. Während die Abgase über den Kamin in die Umwelt emittiert werden, müssen die Schlacke und die

⁴ Vgl. § 13 Abs. 1 KrW-/AbfG.

ausgefilterten Schadstoffe weitestgehend umweltverträglich abgelagert werden. Da diese „Weiterentsorgung“ – wie auch bei vorliegender Analyse – i. d. R. spezialisierte Fremdfirmen übernehmen und somit die Durchführung nicht mehr im operativen Aufgabenfeld des öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers liegt, wird in diesem Bericht auf die Untersuchung dieser weiterführenden Schritte der Entsorgung bzw. Ablagerung verzichtet.

2.3 Sammlung und Transport der Restabfälle

Dieser Abschnitt beschreibt die Prozesse der Sammlung von Restabfällen und deren Transport zu einer Müllverwertungsanlage. Die Analyse erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Aachener Stadtbetrieb. In der kommunalen Abteilung „Abfallwirtschaft und Stadtreinigung“ werden die Aufgaben der öffentlich-rechtlichen Entsorgung von der Stadt Aachen selbst wahrgenommen; ein privates Drittunternehmen ist nicht bestellt. Gleiches gilt in Abschnitt 2.4 für die Müllverwertungsanlage Bonn, die zwar als GmbH geführt, aber ebenfalls in kommunaler Trägerschaft betrieben wird. Betrachtete Überlassungspflichtige i. S. d. § 13 Abs. 1 KrW-/AbfG sind bei vorliegender Analyse ausschließlich private Konsumenten;⁵ Prozesse der Gewerbeabfallentsorgung werden nicht untersucht.

2.3.1 Fahrt in das Entsorgungsgebiet und Behälterbereitstellung

Somit sind zwei Hauptakteure am Prozessverlauf beteiligt: Der *Überlassungspflichtige* [ÜPF] ist als Abfallverursacher dazu verpflichtet, seine Abfälle, sofern sie nicht nach § 13 Abs. 3 KrW-/AbfG anderen Sammelsystemen zugeführt werden, dem *öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger* [ÖRE] zu überlassen,⁶ dessen Aufgabe darin besteht, die ordnungsgemäße Verwertung bzw. Beseitigung betroffener Abfallarten – wie bspw. Restmüll – sicherzustellen.⁷

Der Kollektionsprozess startet in der Regel zum satzungsgemäß festgelegten Leerungstermin. Für gewöhnlich werden Restabfallbehälter alle ein, zwei, drei oder vier Wochen entleert, wobei der Entleerungsturnus in der Abfallsatzung der jeweiligen Kommune geregelt wird.⁸ Im vorliegend dargestellten Prozess, der in Zusammenarbeit mit dem Stadtbetrieb Aachen erhoben wurde, sind vorrangig drei Objektarten für die Sammlung relevant: Ein *Sammelfahrzeug*, auf dem der prozessrelevante und einzusammelnde *Restmüll* umgeschlagen und abtransportiert wird, sowie *menschliche Arbeitskräfte* (Fahrer und Lader), die den Umschlagsprozess vorbereiten und durchführen.⁹

⁵ Vgl. § 13 Abs. 1 KrW-/AbfG.

⁶ Vgl. § 13 Abs. 1 und 3 KrW-/AbfG.

⁷ Vgl. § 15 KrW-/AbfG.

⁸ Vgl. z. B. § 14 Abs. 1 Abfallwirtschaftssatzung der Stadt Aachen.

⁹ Bis auf den Restmüll stellen diese Objektarten Potenzialfaktoren dar, die für gewöhnlich unverändert aus den Prozessen wieder hervorgehen. Für eine umfassende, quantitative Aufwandsanalyse müsste ihre Leistungsabgabe in den Prozess gemessen werden, was bei vorliegender Untersuchung allerdings nicht im Fokus steht. Hier interessiert mehr die Prozessdauer und somit die Einsatzzeit der Objekte, die

Ausgangspunkt der Sammeltour ist der Betriebshof des Entsorgungsträgers. Die nachfolgend aufgezeigte Tour zur Restmülleinsammlung wird von vier Ladern [LAD] und einem Fahrer [FAR] durchgeführt, die zu Beginn das noch unbefüllte und unbesetzte Sammelfahrzeug [$S_{u,u}$] besteigen. Dieser fünfminütige Prozess, in Abbildung 2-2 mit Prozess 1.2 gekennzeichnet, bringt das Objekt „unbefülltes, voll besetztes Sammelfahrzeug“ [$S_{u,v}$] hervor.¹⁰

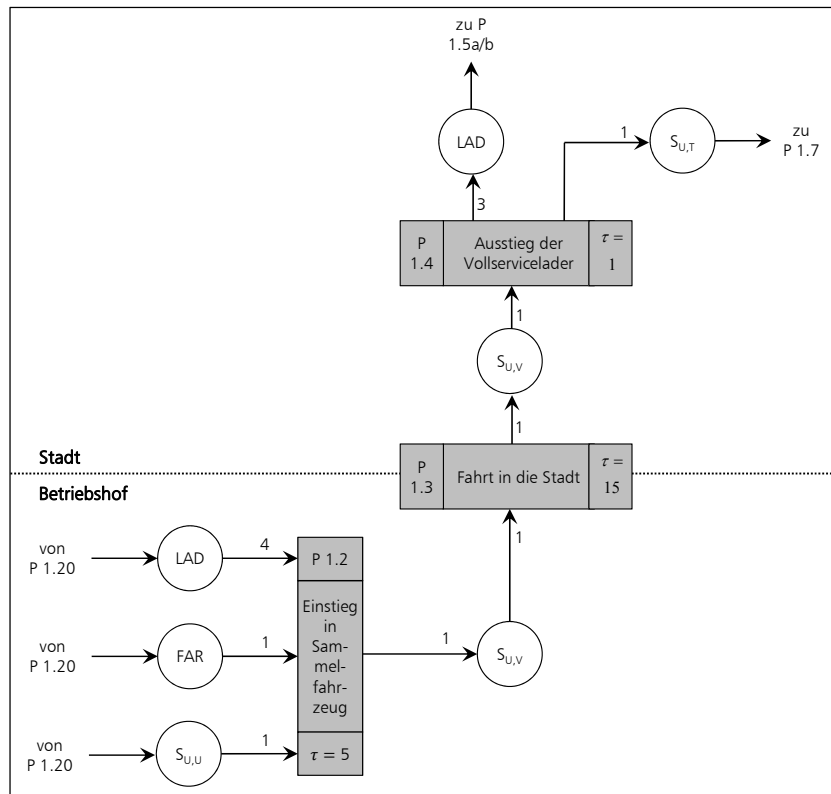


Abbildung 2-2: Fahrt in die Stadt

Im Anschluss daran verlässt das Sammelfahrzeug den Betriebshof und begibt sich auf den Weg zum Sammelgebiet in der Stadt, womit gleichzeitig die Sphäre des Entsorgungsträgers verlassen wird. Dieser Transportprozess – in der Grafik als Prozess 1.3 abgebildet – dauert gemäß vorliegender Erhebung 15 Minuten und endet am ersten Tonnenstandort der Sammeltour. Drei der vier Lader verlassen anschließend das Fahrzeug; ihre Aufgabe ist es, im weiteren Verlauf die Tonnen der Vollservice Teilnehmer zur Abfuhr bereitzustellen. Der Ausstiegsprozess ist als Prozess 1.4 kenntlich gemacht und dauert eine Minute. Outputobjekte dieser Entbündelung sind

für die Dauer maßgeblich sind (vgl. dazu Dyckhoff 2006, S. 46). Somit werden im Folgenden die Prozessfaktoren in Hinblick auf ihre Anzahl bei der Prozessbeschreibung modelliert und die Prozessdauer – die gleichzeitig die Einsatzzeit der Faktoren darstellt – als Prozessparameter τ in den Prozesskästen vermerkt. Die Angaben der Zeiten erfolgt (falls nicht anderweitig vermerkt) in Minuten.

¹⁰ Auch wenn – wie bereits beschrieben – die Potenzialfaktoren unverändert aus Prozessen wieder hervorgehen, werden aus Gründen der Praktikabilität an dieser Stelle die beteiligten Faktoren in *einer* einzigen, neuen geschaffenen Objektart zusammengefasst. Dieser „Bündelungsprozess“ ändert nichts an der materiellen Beschaffenheit der einzelnen beteiligten Objekte, die davon unberührt bleibt.

die drei Lader [LAD] sowie das Sammelfahrzeug, das nun unbeladen und teilbesetzt (mit dem Fahrer und einem Lader) ist [$S_{U,T}$].

Im Anschluss beginnen die ausgestiegenen Müllwerker umgehend damit, die Behälter aus dem Behälterstandplatz auf dem Grundstück der Überlassungspflichtigen herauszuholen und abfuhrbereit an den Straßenrand zu stellen. Annahmegemäß sind die Behälter vorab durch den Überlassungspflichtigen [ÜPF] mit Abfällen befüllt worden, was als (notwendiger) Vorkombinationsprozess auf der Kundenseite modelliert wird.¹¹ Da die vorliegende Analyse beispielhaft die Abfuhr zweier unterschiedlicher Normbehälter (120 l und 1.100 l) betrachtet, ist dieser Vorlaufprozess in Abbildung 2-3 in die Prozesse 1.1a (für die 120 l-Tonne) und 1.1b (für die 1.100 l-Tonne) aufgespalten. Formal wird die entsprechend leere Tonne [$MGB_{120,L}$ oder $MGB_{1100,L}$] mit dem Restmüll [RM] gebündelt, und es entsteht jeweils eine befüllte Tonne [$MGB_{120,B}$ bzw. $MGB_{1100,B}$]. Die Inputquantitäten des Restmülls betragen beispielhaft 18 kg bei der 120 l-Tonne bzw. 165 kg bei der 1100 l-Tonne.¹² Die Dauer dieser Prozesse entspricht dem Abfuhrintervall (im Beispiel 14 Tage), wobei die Befüllung in der Regel diskontinuierlich durchgeführt wird.

Um den befüllten Behälter zur Abfuhr bereitstellen zu können, betritt ein Lader das Grundstück des Überlassungspflichtigen und wechselt so in dessen Verfügungsbereich (Prozess 1.5a/b, „Stellplatz betreten“). Dabei teilt sich der Prozesspfad ausgehend vom Objekt „Lader“ zunächst in zwei Richtungen auf, was daran zu erkennen ist, dass dem Objekt eine sog. Pfadweiche – dargestellt als kleines Dreieck – mit zwei möglichen Richtungen folgt. Der Lader kann im Sinne des Prozessverlaufs nur einem der beiden Prozesspfade folgen; je nachdem, welche Tonne im Vollservice bedient wird, führt der Lader entweder Prozess 1.5a (120 l-Tonne) oder Prozess 1.5b (1.100 l-Tonne) aus. Dort nimmt er die befüllte Restabfalltonne auf und transportiert sie zum vorgesehenen Umladepunkt, der sich in der Regel am Straßenrand befindet. Durch diesen weiteren Transportprozess, dargestellt in Abbildung 2-3 als Prozess 1.6a bzw. Prozess 1.6b, wird die Tonne kurzfristig aus der Sphäre des Überlassungspflichtigen entfernt.

Im Anschluss betritt der Lader entweder erneut das Grundstück, um weitere Tonnen zu holen, oder begibt sich zum nächsten Grundstück und stellt die dort befindlichen Behälter an die Straße. Aufgrund der Gleichartigkeit des Prozessablaufs ähnelt dies einem zyklischen Prozess bei

¹¹ Sämtliche Prozesse, die nicht durch den Entsorgungsbetrieb selbst durchgeführt werden, sind in der Abbildung grau schraffiert. Der aus der Dienstleistungstheorie bekannte Begriff „Vorkombination“ wurde hier bewusst gewählt, auch wenn es sich nicht um eine Aktivität des Dienstleistungsanbieters, sondern des Nachfragers handelt (Konsument als Co-Produzent). Ohne die Bereitstellung des sog. „externen Faktors“ Restmüll könnten die anschließenden Prozesse (Behälterleerung) zwar technisch durchgeführt werden, eine ökonomische Leistungserbringung (Leerung des befüllten Behälters) würde aber nicht stattfinden. Vgl. zur Notwendigkeit externer Faktoren für die Produktion erwartungsorientierter Dienstleistungen beispielhaft Rück 2000, S. 205, und Corsten/Gössinger 2007, S. 129f.

¹² Die Quantitäten beruhen bei beiden Behälterausführungen auf den Annahmen, dass zum einen die Behälter restlos gefüllt werden und der enthaltene Restmüll zum anderen eine Dichte von 0,15 kg/l aufweist. Der in verschiedenen Studien nachgewiesene Effekt, dass mit steigendem Behältervolumen die Restmüllsdichte abnimmt (vgl. beispielhaft für die Stadt Rostock Zoth 2007, S. 58 sowie die dort genannten weiterführenden Quellen), wurde aus Gründen der Vereinfachung vernachlässigt.

dem der Potenzialfaktor „Lader“ immer wieder den gleichen Arbeitsgang durchführt.¹³ Dies ist in der Abbildung zunächst daran zu erkennen, dass dem Outputobjekt „Lader“ des Prozesses 1.6a bzw. 1.6b erneut eine Pfadweiche mit zwei Pfaden folgt. Der zyklusinitiiierende Pfad läuft zu Prozess 1.15a „Gang zum nächsten Grundstück“, und startet so die Prozessschleife. Input und Output ist jeweils ein Lader, der dafür annahmegemäß weniger als eine halbe Minute benötigt und anschließend wieder in die bereits beschriebenen Prozesse Nr. 1.5a oder 1.5b „Stellplatz betreten“ übergeht. Dieser Zyklus wird in der Folge so oft durchlaufen, bis die Mülltonnen aller Überlassungspflichtigen abholbereit an die Straße gestellt wurden. Danach wird die Schleife unterbrochen und der zweite Pfad eingeschlagen, der zu Prozess 1.15b („Pause“) führt. Dieser durchschnittlich 45 Minuten andauernde Prozess bildet die Erholungspause ab, die die Müllwerker nach der Bereitstellungsrunde abhalten.

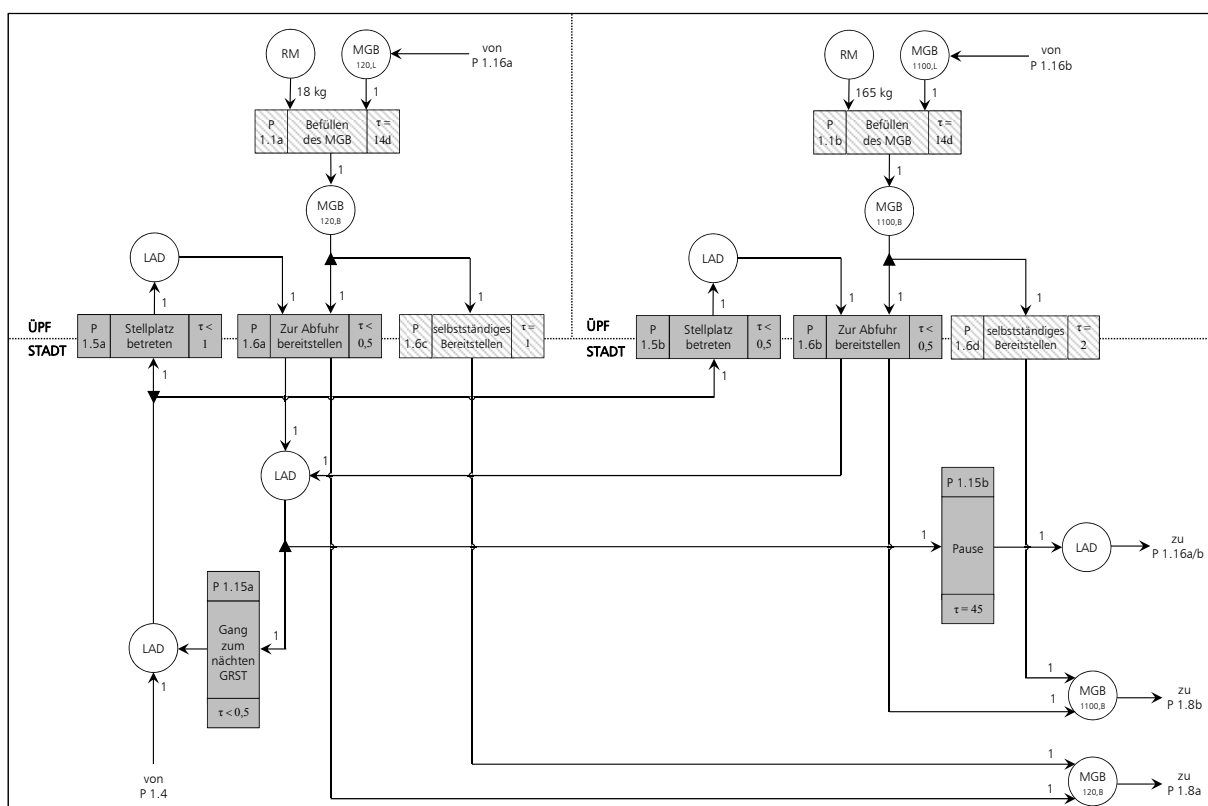


Abbildung 2-3: Bereitstellung der Abfallbehälter

Neben den Überlassungspflichtigen, die den beschriebenen Volls-service gewählt haben, gibt es auch Bürger, die lediglich Teilservice in Anspruch nehmen und folglich ihre Tonne selbst zur

¹³ Wird von der wechselnden Ortslage abstrahiert, kann ein Zyklus an dieser Stelle angenommen werden, da betrachtete Prozesse aus technischer und betriebswirtschaftlicher Sicht auf vorliegender Abstraktionsebene identisch sind. Einzig die Prozessdauer der einzelnen Prozesse könnte unterschiedlich sein, was aus Praktikabilitätsgründen für diesen Zweck der Analyse allerdings vernachlässigt werden muss, sodass ein realistischer Durchschnittswert angegeben ist. Alternativ könnte der Bereitstellungsprozess auch höher aggregiert modelliert werden, indem die Prozesse 1.5a, 1.6a (bzw. 1.5b, 1.6b) und 1.15a zu einem Gesamtprozess „MGB an die Straße stellen“ zusammengefasst werden. Auf eine prozessinterne Schleife könnte dann verzichtet werden.

Abfuhr bereitstellen müssen. Auch wenn dieser eigens durchgeführte Bereitstellungsprozess (wie auch das Befüllen der Tonnen) nicht durch den Entsorgungsträger erbracht wird, ist der Prozess der Vollständigkeit halber in der Modellierung als Prozess 1.6c bzw. 1.6d aufgenommen worden (grau schraffiert Prozesskasten), wobei nur die befüllte Tonne als Input- und Outputobjekt berücksichtigt wird. Somit wird gleichzeitig sichergestellt, dass sämtliche Behälter der Tour mit der nachfolgend beschriebenen Entleerung erfasst werden.

2.3.2 Behälterentleerung und Transport zur Müllverbrennungsanlage

Die eigentliche Leerung – dargestellt in Abbildung 2-4 – beginnt am ersten Umladepunkt, an dem eine befüllte Tonne $[MGB_{120,B}]$ bzw. $[MGB_{1100,B}]$ bereitgestellt wurde. Die damit verbundenen Prozesse werden von dem verbliebenen Lader und dem Sammelfahrzeug durchgeführt. Dazu steigt der Müllwerker zunächst aus dem Fahrzeug (Prozess 1.7, „Laderabstieg“) und begibt sich anschließend zur ersten bereitgestellten Tonne. Folglich wird das teilbesetzte und unbefüllte Objekt $S_{U,T}$ entbündelt, woraus der Lader $[LAD]$ und das unbefüllte, und immer noch teilbesetzte Sammelfahrzeug $[S_{U,T}]^{14}$ hervorgehen.

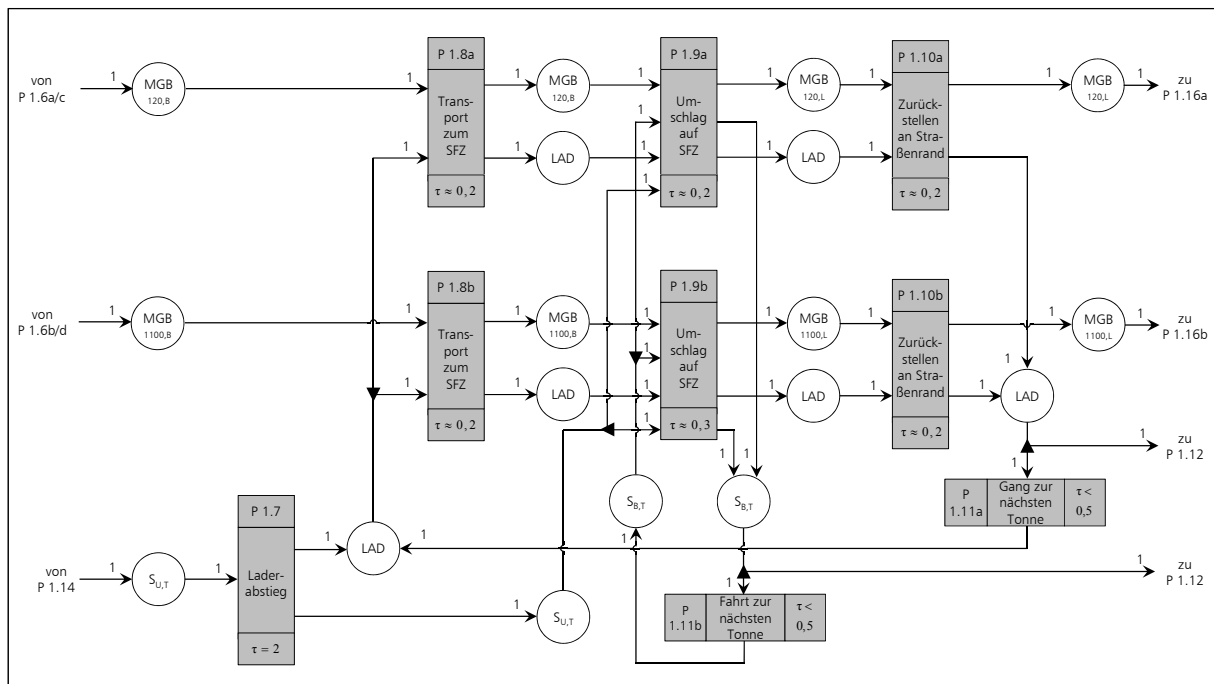


Abbildung 2-4: Restmüllumschlag auf das Sammelfahrzeug

Die Mülltonne wird anschließend durch den Lader zum Müllfahrzeug transportiert, wobei dies je nach Behältergröße entweder als Prozess 1.8a (120 l) oder Prozess 1.8b (1.100 l) in der Abbil-

¹⁴ Theoretisch könnte eine weitere Objektart geschaffen werden, die auf das lediglich vom Fahrer besetzte Fahrzeug abzielt. Aus Gründen der Vereinfachung wird darauf an dieser Stelle aber verzichtet und in Kauf genommen, dass beide Objektarten trotz unterschiedlicher Zusammensetzung gleich benannt werden.

dung modelliert ist und jeweils ca. 0,2 Minuten¹⁵ in Anspruch nimmt. Auch der anschließende Entleerungsprozess „Umschlag auf Sammelfahrzeug“ (Prozess 1.9a bzw. 1.9b) wird durch den Lader vorgenommen, da das Müllfahrzeug annahmegemäß über keinen eigenen Greifarm verfügt. Dazu wird die Tonne am Einhangmechanismus des Entleerungsfahrzeuges befestigt und anschließend per Knopfdruck durch die hydraulisch unterstützte Kippung entleert. Während dieses Vorgangs wird das Objekt „befüllter Müllgroßbehälter“ [MGB_{120,B} oder MGB_{1100,B}] wieder entbündelt, und es entstehen die Objekte „Restmüll“ [RM] und „leerer Müllgroßbehälter“ [MGB_{120,L}] bzw. [MGB_{1100,L}]. Da allerdings der Restmüll direkt in das unbefüllte und teilbesetzte Sammelfahrzeug [S_{U,T}] überführt wird, geht letztlich nur das Objekt „befülltes und teilbesetztes Sammelfahrzeug“ [S_{B,T}] aus dem Umschlag hervor. Folglich besteht der Output des gesamten Umschlagprozesses, der insgesamt etwa 0,2 Minuten für die 120 l-Tonne und etwa 0,3 Minuten für die 1.100 l-Tonne in Anspruch nimmt, letztlich aus dem Lader [LAD], dem befüllten und teilbesetzten Müllfahrzeug [S_{B,T}] sowie der entleerten Restmülltonne (je nach Prozess [MGB_{120,L}] oder [MGB_{1100,L}]).

Im nächsten Schritt stellt der Lader die entleerte Tonne zurück an den Straßenrand, was in Prozess 1.10a bzw. 1.10b dargestellt ist und einem einfachen Transportprozess entspricht. Dieser Prozess verläuft somit spiegelbildlich zum Prozess 1.8a bzw. 1.8b und dauert etwa 0,2 Minuten. Anschließend begibt sich der Lader – ebenso wie das nun (teil-)befüllte Sammelfahrzeug – auf den Weg zur nächsten bereitgestellten Tonne, wo die geschilderten Prozesse der Behälterentleerung (Prozess 1.8a/b, 1.9a/b und 1.10a/b für den Lader sowie 1.9a/b für das Sammelfahrzeug) erneut stattfinden. In der Abbildung ist diese zyklische Prozessstruktur wiederum an der eingefügten Prozessweiche zu erkennen, die nach dem Outputobjekt [S_{B,T}] der Prozess 1.9a/b und nach dem Outputobjekt [LAD] der Prozess 1.10a/b eingefügt ist und den Prozesspfad jeweils aufteilt. Solange nicht sämtliche Behälter der Tour entleert wurden, führt der Prozesspfad für den Müllwerker zunächst immer zu Prozess 1.11a und für den Müllwagen zu Prozess 1.11b, die den eben genannten Gang bzw. die Fahrt zur nächsten Tonne darstellen und annahmegemäß weniger als eine halbe Minute in Anspruch nehmen.

Für Prozess 1.9a/b ist allerdings die Besonderheit zu beachten, dass mit der ersten Prozessschleife nunmehr immer das befüllte (und teilbesetzte) Sammelfahrzeug [S_{B,T}] den Prozess durchführt und nicht mehr das den ersten Prozess durchführende leere Müllfahrzeug [S_{U,T}]. Insofern wird ab der zweiten Durchführung des Prozesses das Inputobjekt [S_{U,T}] jedes Mal durch das Inputobjekt [S_{B,T}] ersetzt.

Nach der letzten Behälterentleerung ist die Sammeltour für das Sammelfahrzeug und den Lader beendet und somit auch die beschriebenen Prozessschleifen. Folglich führen – wie in Abbildung 2-5 zu erkennen – die Prozesspfade beider Objekte zu Prozess 1.12. Dieser halbminütige Vorgang stellt die „Laderaufnahme“ dar und bringt das Objekt „befülltes und teilbesetztes Sammelfahrzeug“ hervor. Da der eingesammelte Müll zur weiteren Behandlung in eine Müllverwertungsanlage überführt werden muss, schließt sich die Fahrt dorthin direkt an. Dieser ca. 20-minütige „Restmülltransport zur MVA“ ist in der Abbildung als Prozess 1.13 visualisiert und

¹⁵ Gerundete Zeitangaben wurden mathematisch auf eine Nachkommastelle auf- oder abgerundet.

verdeutlicht, dass das Fahrzeug dabei in den Verfügungsbereich der Müllverbrennungsanlage [MVA] wechselt.

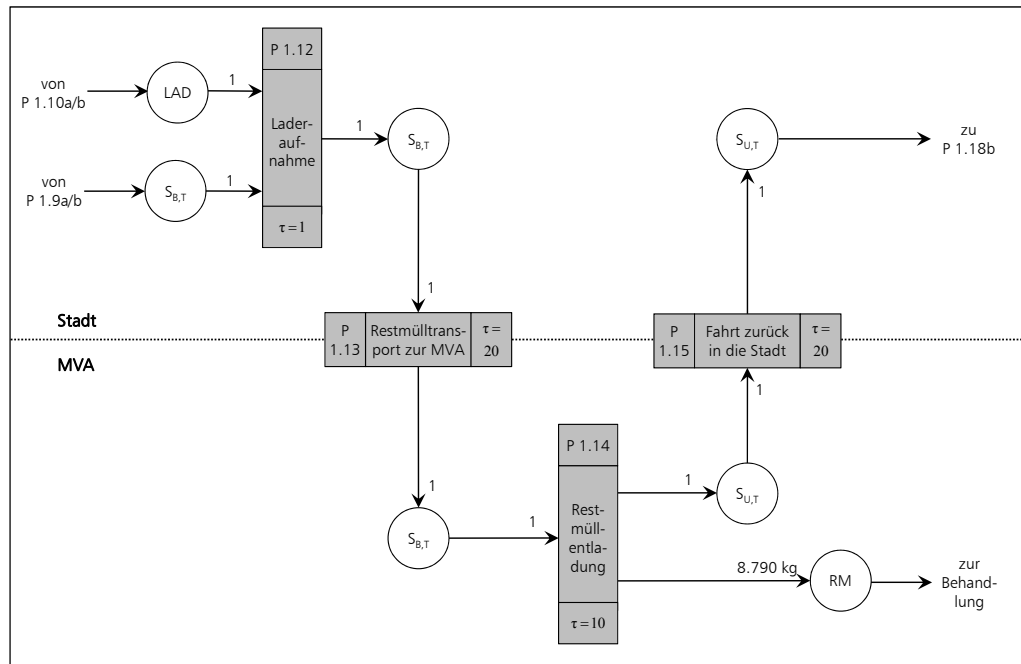


Abbildung 2-5: Restmülltransport zur Müllverbrennungsanlage

Dort angekommen, wird das Fahrzeug zunächst verwogen (hier nicht expliziert modelliert), um bei der Rückfahrt die abgeladene Restmüllquantität ermitteln zu können. Anschließend fährt das Sammelfahrzeug weiter zur vorgesehenen Kippstelle und entlädt die eingesammelten Abfälle in den Bunker der Müllverwertungsanlage. Dieser Prozess 1.14 „Restmüllentladung“ bringt somit die wieder getrennten Objekte „unbefülltes und teilbesetztes Sammelfahrzeug“ [$S_{U,T}$] sowie „Restmüll“ [RM] hervor, wobei von letzterem im Schnitt 8.790 kg abgeladen werden.¹⁶ Während die Abfälle im Anschluss an den Umschlag, der insgesamt ca. 10 Minuten dauert, in der Anlage verbleiben und somit zur weiteren Behandlung an die Betriebseinheit übergeben wurden,¹⁷ verlässt das geleerte Sammelfahrzeug nach einer Kontrollverwiegung die Anlage wieder. Der als Prozess 1.15 modellierte Transportprozess „Fahrt zurück in die Stadt“ führt den geleerten Müllwagen [$S_{U,T}$] wieder zurück in die Stadt, um die dort verweilenden Müllwerker einzusammeln. Insgesamt nimmt diese Rückfahrt erneut etwa 20 Minuten in Anspruch.

2.3.3 Behälterrückstellung und Fahrt zum Betriebshof

Die in der Stadt verbliebenen Lader haben in der Zwischenzeit damit begonnen, die entleerten Vollservicetonnen wieder an ihren ursprünglichen Standort auf den Grundstücken der Überlassungspflichtigen zurückzustellen. Dieser „Transport zum Stellplatz“ durch die Müllwerker, in

¹⁶ Die angegebene Restmüllquantität stellt lediglich einen Mittelwert dar und schwankt u. a. in Abhängigkeit der Anzahl geleerter Tonnen.

¹⁷ Der weitere „Werdegang“ des Restmülls wird in Abschnitt 2.4 noch weiter untersucht.

Abbildung 2-6 je nach Tonnengröße als Prozess 1.16a (120 l) oder 1.16b (1.100 l) gekennzeichnet, folgt somit auf den „Erholungspausen“-Prozess 1.15b. Folglich läuft auch der vom Lader [LAD] ausgehende Prozesspfad entsprechend der Behältergröße entweder zu Prozess 1.16a, oder 1.16b. In jedem Fall betritt der Müllwerker dazu wieder die Sphäre des Überlassungspflichtigen und überführt die Tonne zurück in dessen Verfügungsbereich. Somit steht die Tonne für den nächsten Befüllungszyklus bereit, der in dem bereits skizzierten Prozess 1.1a/b stattfindet.¹⁸

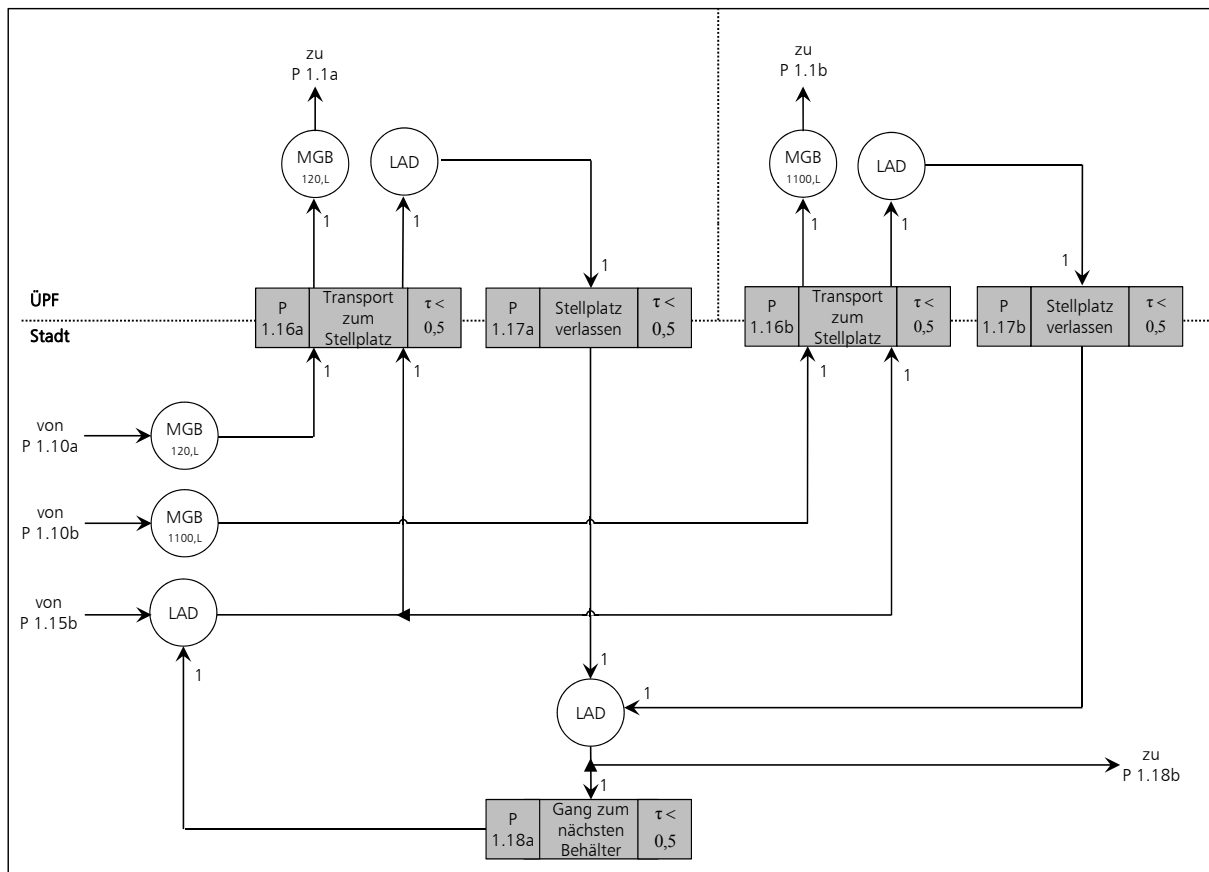


Abbildung 2-6: Rückstellen der geleerten Behälter

Im Anschluss verlässt der Lader das Grundstück (Prozess 1.17a bzw. 1.17b) und begibt sich zunächst zur nächsten Tonne. Damit startet erneut ein zyklischer Prozess, der mit der Pfadabzweigung zu Prozess 1.18a „Gang zum nächsten Behälter“ eingeleitet wird und annahmegemäß weniger als eine halbe Minute dauert. Der Lader führt im Anschluss erneut die Prozesse 1.16a bzw. 1.16b aus. Erst wenn alle Behälter auf die vorgesehenen Stellplätze zurückbefördert wurden, wird die Schleife unterbrochen und der Prozesspfad des Müllwerkers führt zu Prozess 1.18b.

¹⁸ Auf die Modellierung des entsprechenden Teilservice-Rückstell-Prozesses, den der Überlassungspflichtigen selbst durchgeführt, wird an dieser Stelle verzichtet, da er den nachfolgenden Prozessverlauf nicht beeinflusst und insofern nicht die gleiche Relevanz besitzt wie der notwendige Vorkombinationsprozess 1.6c/d „selbstständiges Bereitstellen“, ohne den die Behälterleerung nicht hätte durchgeführt werden können.

An dieser Stelle treffen die verbliebenen Lader auf das von der Müllverbrennungsanlage zurückgekehrte geleerte Sammelfahrzeug und steigen auf den Wagen auf, um anschließend zusammen zum Betriebshof zurückzukehren.¹⁹ Dieser Bündelungsprozess der drei „Lader“-Objekte mit dem unbefüllten und teilbesetzten Sammelfahrzeug führt zum Objekt „unbefülltes und voll besetztes Sammelfahrzeug“ [$S_{U,V}$] und ist in Abbildung 2-7 als einminütiger Prozess 1.18b „Laderaufnahme“ gekennzeichnet. Das Fahrzeug begibt sich – wie im (Transport-)Prozess 1.19 kenntlich gemacht – sodann auf den 15-minütigen Weg zurück zum Betriebshof. Gleichzeitig verlässt es bei der Einfahrt in den Betriebshof den öffentlichen Verfügungsraum der Stadt und tritt in die privatwirtschaftliche Sphäre des kommunalen Entsorgungsverantwortlichen ein. Dort angekommen wird das Fahrzeug abgestellt und die Müllwerker steigen aus, was wiederum einem Entbündlungsprozess (Prozess 1.20 „Ausstieg Fahrer und Lader“) entspricht. Es entstehen dabei wieder die Ursprungsobjekte „Lader“ [LAD], „Fahrer“ [FAR] und „unbefülltes und unbesetztes Sammelfahrzeug“, die Ausgangspunkt des gesamten Sammeltourprozesses (siehe Prozess 1.2) gewesen sind. Die Tour ist damit beendet.

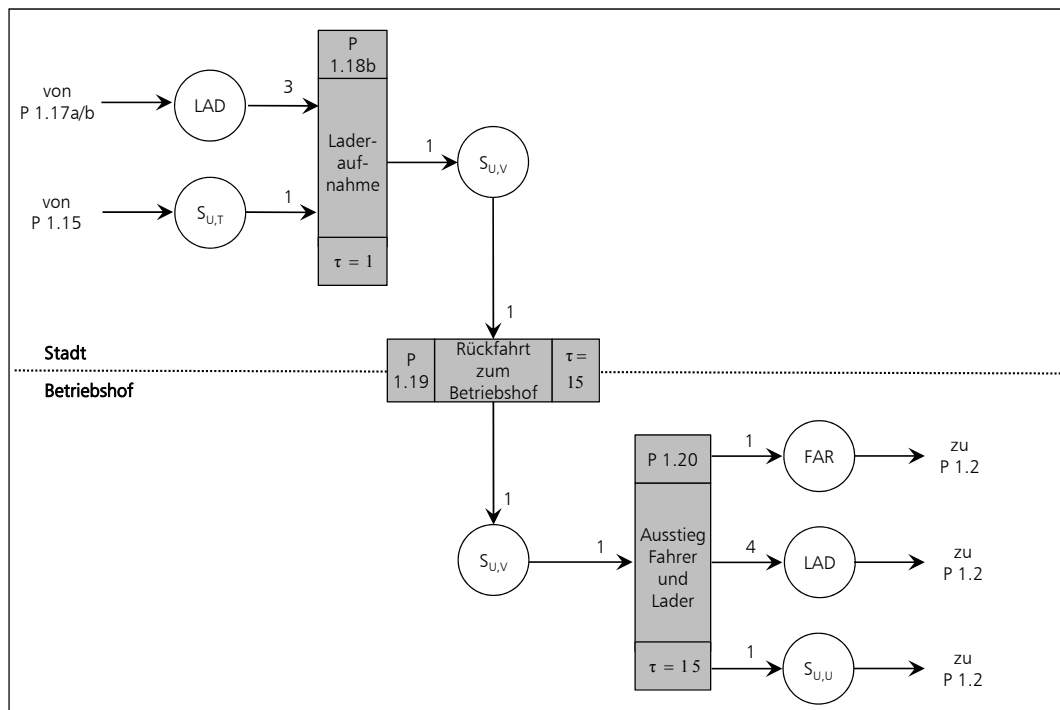


Abbildung 2-7: Rückfahrt zum Betriebshof

Die betrachteten Potenzialfaktoren befinden sich in einem großen Prozesszyklus, da alle beschriebenen Prozesse in ähnlicher Form am nächsten Tag (auf einer anderen Tour) erneut ablaufen. Einzig das eingesammelte Objekt „Restmüll“, das als Repetierfaktor eingestuft werden muss,

¹⁹ Im Normalfall würde das Sammelfahrzeug nun Bioabfall einsammeln und erst danach die Lader aufnehmen. Da die Modellierung aber nur auf die Restabfallentsorgung ausgerichtet ist, wird dieser Aspekt vernachlässigt, zumal anzunehmen ist, dass die Prozessstrukturen der Bioabfalleinsammlung mit denen der Restmülleinsammlung nahezu identisch sind.

verlässt den Gesamtprozess „Sammlung und Transport“ und geht in die nächste Prozessstufe „Behandlung“ über.

2.4 Thermische Behandlung der Restabfälle

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben einen beispielhaften Prozessverlauf der Restmüllbehandlung, wobei auf die thermische Verwertung – sprich Abfallverbrennung – als zulässiges Behandlungsverfahren fokussiert wird.²⁰ Der Behandlungsablauf kann hierbei in die Phasen *Annahme und Lagerung*, *Verbrennung und Dampferzeugung* sowie *Abgasreinigung* unterteilt werden, woran auch die nachfolgende Kapitelgliederung orientiert ist. Wie eingangs bereits erwähnt, bildet die dargestellte Prozessstruktur die Abläufe der MVA Bonn ab. Die dazugehörigen Prozessinformationen wurden durch den Projektpartner bereitgestellt und entstammen zum Großteil Auswertungen von Tages- und Jahresberichten, auf deren Basis Durchschnitte gebildet wurden. Da die folgende Beschreibung auf der Darstellung von Grundaktivitäten beruht, wurden zusätzlich – sofern zweckmäßig – die Objektquantitäten bezogen auf die Verbrennung von 1.000 kg (1 Mg) Hausmüll in Klammern darunter angegeben, um den spezifischen Einsatz bzw. die spezifische Ausbringung hierfür abschätzen zu können.²¹

2.4.1 Annahme und Lagerung

Nach erfolgter Restmüllentladung setzt sich der Entsorgungsprozess in der Müllverwertungsanlage fort. Die Abladung erfolgte direkt in den Bunker der Anlage, der vorrangig als physisches Zwischenlager sämtlicher Abfälle, die im weiteren Verlauf thermisch verwertet werden sollen,²² dient. Bei ausreichendem Füllstand ist dadurch ein kontinuierlicher Verbrennungsablauf auch an Tagen ohne Müllanlieferung gewährleistet.²³ Demgegenüber sichert er auch im Falle des Ausfalls einer oder mehrerer Verbrennungslinien die Funktion der MVA als Abfallabnehmer. Darüber hinaus wird der Bunkerraum genutzt, um den angelieferten Hausmüll mit anderen Müllfraktionen (v. a. Sperr- und Gewerbemüll) zu vermischen. Dabei wird das Ziel verfolgt, ein möglichst heizwertgleiches Brennstoffgemisch herzustellen, das einen optimalen, d. h. vorrangig schadstoffarmen, Verbrennungsverlauf ermöglicht.²⁴

Die graphische Modellierung der beschriebenen Prozesse ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Prozess 2.1 „Vermischung“ stellt den (materiellen) Vermischungsprozess dar, der nach der Abkipfung erfolgt. Ein Mg Brennstoff [BrS], der aus dem Prozess hervorgeht, setzt sich dabei durchschnittlich aus 750 kg Restmüll [RM], 225 kg Sperrmüll [SpM] sowie 25 kg Gewerbeabfällen [GwA] zusammen, wobei die letzteren beiden Abfallfraktionen i. d. R. durch private oder ge-

²⁰ Eine alternativ zulässige Methode ist etwa die mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA), vgl. SRU 2008, S. 419.

²¹ Die Quantitätsangaben in Klammern entsprechen somit der aus der Stoffstromanalyse bekannten *Stoffflussmenge* für die Behandlung von 1 Mg Brennstoff.

²² Vgl. Thomé-Kozmiensky 1994, S. 87.

²³ Vgl. Dirks 2000, S. 45.

²⁴ Vgl. Dirks 2000, S. 46.

werbliche Kunden angeliefert werden. Dieser Prozess, der durch den Bunkerkranfahrer mittels der Greifarme gesteuert wird, dauert etwa 1,5 Minuten und wird bei Bedarf mehrmals ausgeführt, bis der gewünschte Vermischungsgrad erreicht ist. Allerdings kann der Heizwert des so erzeugten finalen Brennstoffgemischs vorab nicht exakt bestimmt werden, er zeigt sich erst bei der später stattfindenden Verbrennung. Insofern basiert das (qualitative) Prozessergebnis einzig auf der Einschätzung des Kranführers.

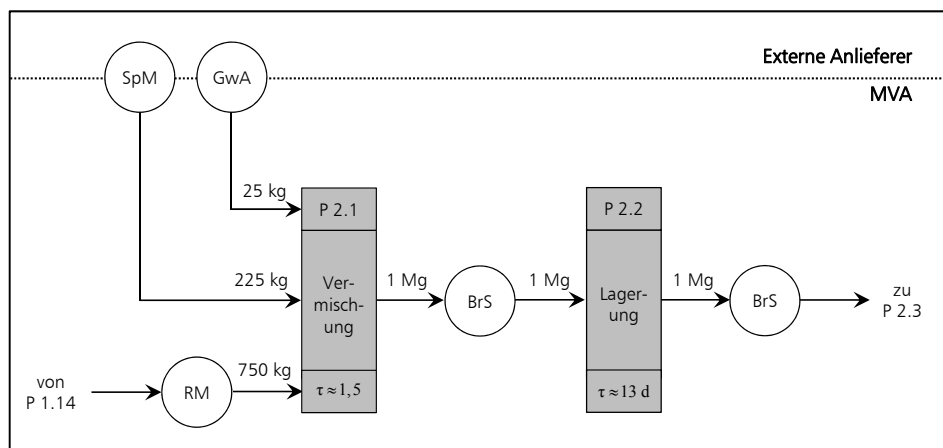


Abbildung 2-8: Vermischung und Lagerung der Abfälle

Im Anschluss wird das Brennstoffgemisch – wie in Prozess 2.2 „Lagerung“ ersichtlich – bis zur Verbrennung zwischengelagert. Die durchschnittliche Lagerzeit beträgt im konkreten Fall etwa 13 Tage, was aus der Division von durchschnittlichem Lagerbestand pro Tag und täglichem Lagerabgang hervorgeht. Die Zwischenspeicherung dient dabei der bereits erwähnten Pufferung für Tage ohne Anlieferung (insb. Sonn- und Feiertage), da die Anlage täglich im 24-Stunden-Betrieb läuft.

2.4.2 Verbrennung und Dampferzeugung

Sobald sich der Brennraum leert, muss der Kranführer den kontinuierlich verlaufenden Verbrennungsprozess mit neuem Brennstoff versorgen. Dazu nimmt er mittels der Greifarme des Bunkerkrans die gemischten Abfälle auf und füllt sie in den Einfülltrichter des Verbrennungsrosters. Dieser in Abbildung 2-9 als Prozess 2.3 „Brennraumbeschickung“ dargestellte Prozess dauert etwa 0,8 Minuten, wobei durchschnittlich 3,75 Mg Brennstoff [BrS] aufgegeben werden.

Im Anschluss daran findet der eigentliche Verbrennungsprozess 2.5 statt. Dabei werden neben dem aufgegebenen Brennstoff auch durchschnittlich 5,75 kg Adsorbens [AdS] mitverbrannt, das aus der nachfolgenden Rauchgasreinigung stammt und Träger verschiedener bereits absorbierter Schadstoffe ist. Für die ordnungsgemäße Verbrennung beider Objekte ist darüber hinaus der Einsatz von Frischluft [FrL] notwendig, da somit der für den Verbrennungsprozess notwendige Sauerstoff bereitgestellt wird. Dazu wird die Frischluft über Außenrohre aus der Umwelt angesaugt und mittels Prozessdampf [PrD] in einem Vorlaufprozess (Prozess 2.4a) erwärmt. Darüber

hinaus wird, um die bei der Verbrennung entstehenden giftigen Stickoxide (NO_x) gleich nach ihrer Entstehung zu binden, zeitgleich Ammoniumhydroxid bzw. Ammoniakwasser [NH_4OH] in die Brennkammer eingedüst,²⁵ das in einem weiteren Vorlaufprozess 2.4b mittels Ammoniak [NH_3] und Prozessdampf [PrD] erzeugt wurde.²⁶

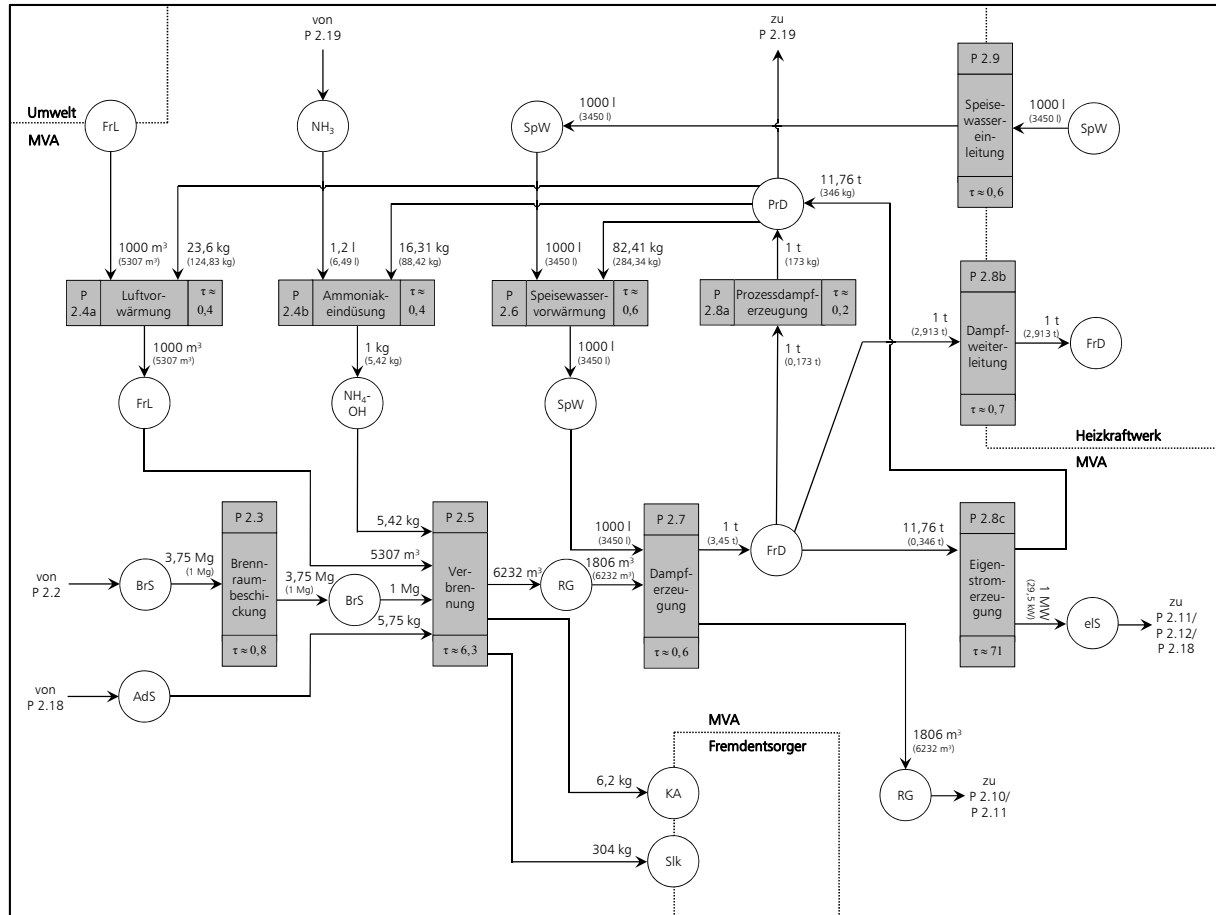


Abbildung 2-9: Verbrennung und Dampferzeugung²⁷

Im Schnitt dauert der Durchsatz eines Mg Abfalls etwa 6,3 Minuten, und es werden dabei etwa 6.232 m³ Rauchgas [RG], 6,2 kg Kesselasche [KA] und 304 kg Schlacke [Slk] hervorgebracht. Während das schadstoffbelastete Rauchgas zunächst zur Erzeugung von Frischdampf genutzt wird, werden Schlacke und Kesselasche ausgeschleust, in separate Bunker überführt und kurzzeitig zwischengelagert. Da beide Abprodukte ebenfalls schadstoffbelastet sind, ist eine weitere Behandlung zwingend erforderlich, die im vorliegenden Fall durch externe Unternehmen durchgeführt wird. Daher werden beide Schadobjekte zeitnah durch sog. Fremdentsorger abgefahren und verlassen damit den Bereich der Müllverbrennungsanlage.

²⁵ Vgl. Thomé-Kozmiensky 1994, S. 553.

²⁶ Sollte der Heizwert des Mülls nicht ausreichen, um die geforderte Verbrennungstemperatur von 850 °C zu erreichen, können darüber hinaus mit Heizöl betriebene Stützbrenner zugeschaltet werden. Da dies aber nicht dem Regelfall entspricht, wurde auf die Abbildung der entsprechenden Objektart verzichtet.

²⁷ Eine vergrößerte Darstellung der Abbildung ist in Anhang A-1 zu finden.

Das Rauchgas wird derweil zur Dampfkesselanlage weitergeführt. Ziel ist es, die heißen Abgase zur Energieerzeugung zu nutzen, was für Müllverbrennungsanlagen zwingend vorgeschrieben ist.²⁸ Da dies einer energetischen Verwertung der Abfälle gleichkommt, sind die Betreiber derartiger Anlagen aus Sicht der Autoren in jedem Fall, also unabhängig vom Heizwert der eingesetzten Abfallobjekte,²⁹ als Abfallverwerter einzustufen, wenngleich der Hauptzweck in der Beseitigung (Reduktion) der Abfälle bestehen bleibt.³⁰ Im dargestellten Prozess 2.7 wird Frischdampf [FrD] erzeugt, indem das heiße Rauchgas [RG] sog. Speisewasser [SpW], das über ein Heizkraftwerk eingeleitet (Prozess 2.9) und mittels Prozessdampf [PrD] vorgewärmt (Prozess 2.6) wurde, durch Erhitzung verdampft. Die Erzeugung einer Tonne Frischdampf erfordert 1.000 l Speisewasser sowie 1.806 m³ Rauchgas und dauert etwa 0,6 Minuten. Entsprechend werden – bezogen auf ein Mg Restmüll und abzulesen in den Klammerwerten – 3,45 t Frischdampf mittels 3.450 l Speisewasser und ca. 6.232 m³ Rauchgas erzeugt. Der Dampf wird anschließend zum großen Teil (ca. 84,5 %) an das benachbarte Heizkraftwerk abgegeben (Prozess 2.8b), das den Dampf wiederum zur Fernwärmung oder zur Stromerzeugung nutzt.

Der restliche Frischdampf wird selbst verwertet, wobei ca. 2/3 des Eigenbedarfs an einen Generator weitergeleitet wird, der damit elektrischen Strom [eS] produziert (Prozess 2.8c) und gleichzeitig den Dampf in weiterhin nutzbaren Prozessdampf [PrD] transformiert. Zur Erzeugung eines Megawatts Strom werden ca. 11,76 t Frischdampf benötigt, wobei für die Herstellung etwa 71 Minuten benötigt werden. Das verbleibende Drittel wird direkt in Prozessdampf umgewandelt (Prozess 2.8a). Dieser wird vor allem für einige z. T. bereits erwähnte Vorlaufprozesse benötigt, etwa zur Frischluftvorwärmung (Prozess 2.4a, Verbrauch ca. 23,6 kg pro 1.000 m³ Frischluft), Ammoniakendüngung (Prozess 2.4b, ca. 16,31 kg pro Kilogramm Ammoniakwasser) oder Speisewasservorwärmung (Prozess 2.6, ca. 82,41 kg pro 1.000 l Speisewasser). Ein Teil strömt darüber hinaus in den sog. „Stripper“, der als Teilprozess der im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Rauchgasreinigung fungiert.

2.4.3 Rauchgasreinigung

Da das Rauchgas eine Vielzahl schädlicher Stoffe und Verbindungen in hohen Mengen enthält – z. B. Dioxine und Furane, Fluorwasserstoffe (HF), diverse Stickstoffoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂), Chlorwasserstoff (HCl), Quecksilber (Hg) bzw. verschiedene andere Schwermetalle – muss es vor der Abgabe in die Umwelt gereinigt werden. Ziel der nachfolgend beschriebenen Rauchgasreinigung ist es somit, die enthaltenen Schadstoffe entweder ganz herauszufiltern oder zumindest in ihrer Konzentration so weit zu reduzieren, dass sie unbedenklich in die Umwelt abgegeben werden können. Maßgeblich für Müllverbrennungsanlagen ist die 17. Bundesimmissi-

²⁸ Vgl. insbesondere § 10 Abs. 2 KrW-/AbfG sowie § 8 der 17. BImSchV.

²⁹ Vgl. zum Heizwertkriterium als eine Entscheidungsgröße für die Einstufung als Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren § 6 Abs. 2 und § 10 Abs. 2 KrW-/AbfG.

³⁰ Vgl. zum Sachziel einer Unternehmung und den daraus resultierenden Produktions- bzw. Reduktionscharakter der durchgeführten Prozesse Dyckhoff 1994, S. 10f.

onsschutzverordnung (17. BlmSchV), die zu kontrollierende Schadstoffe und deren Emissionsgrenzwerte verbindlich vorschreibt.³¹

Das Rauchgas strömt so, nachdem es die Dampferzeugung durchlaufen hat, direkt zu den ersten beiden Reinigungsstufen der Rauchgasreinigung, die in Abbildung 2-10 in Gänze dargestellt ist. Dabei wird das Abgas in zwei Ströme aufgeteilt, wobei ca. zwei Drittel des Volumenstroms in die Sprühtrocknung und ein Drittel direkt in die Elektrofilterung (Prozess 2.11) geleitet werden.

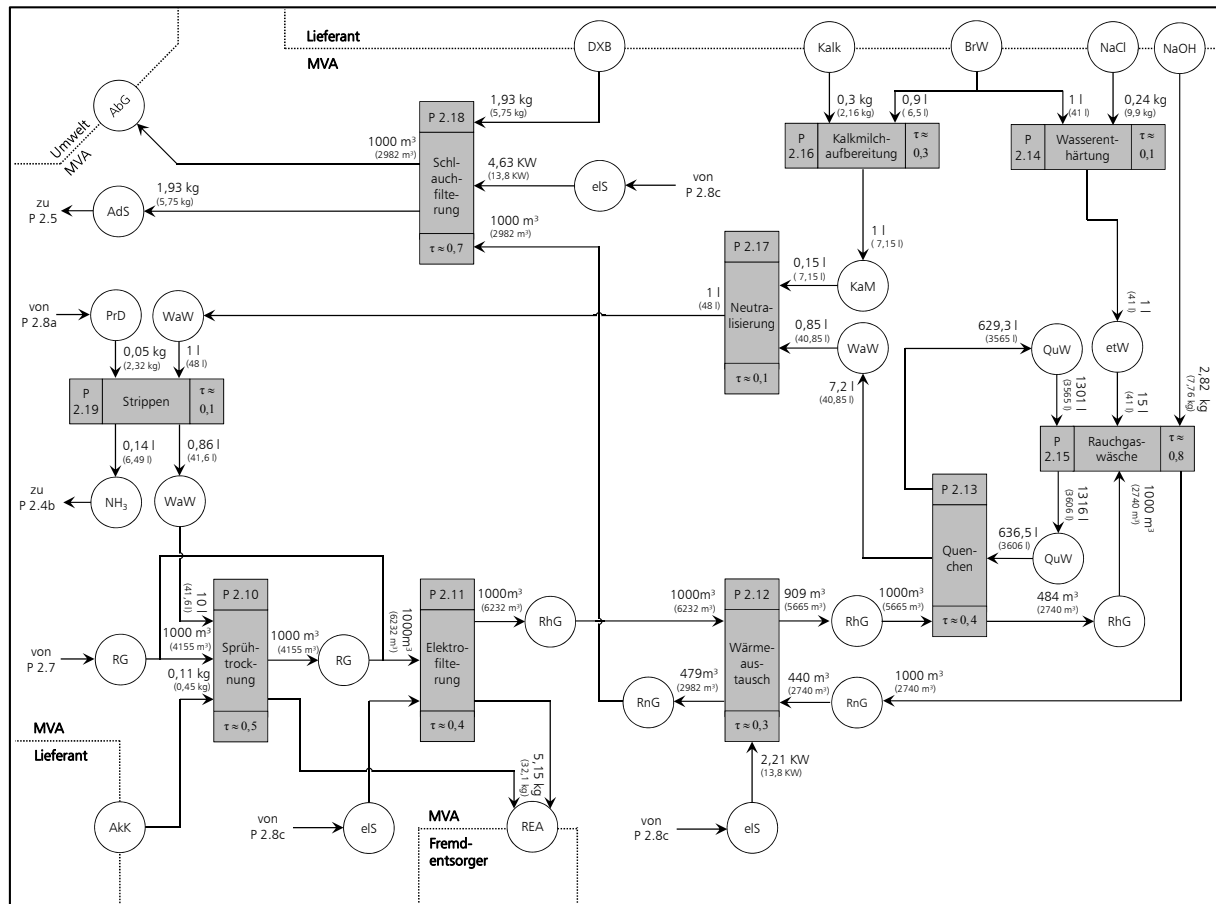


Abbildung 2-10: Rauchgasreinigung

Ziel der als Prozess 2.10 dargestellten Sprühtrocknung ist es, mittels der heißen Rauchgase [RG] schadstoffhaltiges Waschwasser [WaW] einzudampfen, das aus einem bereits erfolgten Reinigungsprozess stammt und vor allem die Schadstoffe HCl, HF, SO₂ sowie einige Schwermetalle enthält. Durch einen Zerstäuber wird das Waschwasser in einzelne Tröpfchen geteilt, die dann mit dem Rauchgas mitgerissen werden und dabei verdampfen. Somit treten auch die genannten Schadstoffe in den gasförmigen Zustand über, werden dann mithilfe von Aktivkohle [Akk] zum großen Teil absorbiert und als Salz [REA] über eine Schleuse ausgetragen. Wird diesbezüglich die Grundaktivität für 10 Liter zu zerstäubendes Waschwasser [WaW] betrachtet, werden etwa 1.000 m³ Rauchgas [RG] und 0,11 kg Aktivkohle [Akk] benötigt; die Prozessdauer beträgt Be-

³¹ Vgl. § 5 der 17. BlmSchV.

rechnungen zufolge etwa eine halbe Minute. Das Rauchgas verlässt anschließend den Prozess und strömt weiter zum Elektrofilter, wo es mit dem anderen Teil des Rauchgases, das die Sprühtrocknung nicht durchlaufen hat, wieder zusammentrifft.

Mit der Elektrofilterung, dargestellt als Prozess 2.11, soll vorrangig der im Rauchgas enthaltene Staub gebunden werden. Dazu durchströmt das Gas [RG] ein durch zwei Elektroden hervorgerufenen elektrisches Feld mit hoher Feldstärke. Diese führt zu Koronaentladungen der im Feld befindlichen Gasmoleküle, die so die im Rauchgas befindlichen Staubpartikel elektrisch aufladen. Ladungsbedingt wandern daraufhin die Staubteilchen [REA³²] an die sog. Niederschlagselektrode, lagern sich dort ab und werden periodisch abgeklopft. Aus dem 0,4-minütigen Prozess gehen somit das staubbefreite Rauchgas, das nunmehr als Rohgas [RhG] bezeichnet wird, sowie die abgetrennten Filterstäube hervor, wobei in Summe mit der Salzabtrennung der Sprühtrocknung insgesamt 5,15 kg Salze und Stäube [REA], bezogen auf 1.000 m³ Rauchgas, ausgetragen werden.

Die nächste Stufe der Rauchgasreinigung ist der sog. Rohgas/Reingas-Wärmeaustausch, dargestellt in Abbildung 2-10 als Prozess 2.12. Dieser Prozess dient der notwendigen Aufwärmung des Reingases [RnG], das aufgrund der vorangegangenen Rauchgaswäsche mit durchschnittlich 65 °C zu kalt für den letzten Reinigungsschritt ist. Um die geforderte Temperatur von 115 °C zu erreichen, durchkreuzen sich die Leitungsrohre von Rein- und Rohgas, wobei das deutlich heißere Rohgas [RhG] einen Teil seiner Wärme abgibt. Allein aufgrund der Wärmeabgabe wird so der Volumenstrom des Rohgases reduziert, entsprechend nimmt das Reingasvolumen zu. Bezogen auf die Basisaktivität für 1.000 m³ Rohgas [RhG], die etwa 0,3 Minuten dauert, reduziert sich selbiges auf ca. 909 m³, während sich das Reingasvolumen [RnG] von 440 m³ auf 479 m³ erhöht. Darüber hinaus ist mit dem Wärmetauscher ein Saugzug verbunden, der für die Weiterleitung der Gase sorgt und für 1.000 m³ Gas ca. 2,21 kW Strom [eIS] benötigt, der über die Eigenversorgung zur Verfügung steht.

Nach erfolgtem Wärmeaustausch tritt das Rohgas in den eigentlichen Nass-Waschprozess ein, der mit dem Quenchen (Prozess 2.13) beginnt. Ziel ist es, vor allem die im Rohgas [RhG] befindlichen Schadstoffe HCl und HF sowie grobe Schwebstoffe zu binden. Dazu wird das Rohgas [RhG] mit sog. Quenchwasser [QuW] berieselt, was aufgrund der verhältnismäßig hohen Wassermenge das Gas bis zur absoluten Sättigungsgrenze stark abkühlt.³³ Das Quenchwasser [QuW] fließt anschließend samt abgekühltem Rohgas [RhG] in den Wäscher und wird von dort wieder zurück in die Quench gepumpt. Da sich auf diese Weise das Wasser immer stärker mit Schadstoffen anreichert, wird bei zu hohen Konzentrationen ein Teil des Wassers als Waschwasser [WaW] in die sog. Neutralisierung gepumpt und durch Wasser aus dem Wäscher ersetzt. Bezogen auf 1.000 m³ Rohgas [RhG] fließen so etwa 636,5 Liter Quenchwasser, wovon durchschnittlich 7,2 Liter als hoch konzentriertes und pH-Wert-saures Waschwasser [WaW] in die Neutralisierung gepumpt werden. Das Gas kühlt sich auf ca. 65 °C ab und erfährt dabei eine Volumenreduzierung auf 484 m³.

³² Unter dem Objekt [REA] werden analog zur realen Erfassung die abgeschiedenen Komponenten „Stäube“ und „Salze“ zusammengefasst.

³³ Vgl. Thomé-Kozmiensky 1994, S. 489.

Wie bereits angedeutet, strömt das Rohgas im Anschluss in die dreistufige Rauchgaswäsche (Prozess 2.15). Unter Zugabe von Natronlauge [NaOH] und enthärtetem Wasser [etW] werden neben HCl, HF und vor allem SO₂ diverse (Schwermetall-)Aerosole absorbiert.³⁴ Ähnlich dem Quenchwasser wird das Wasser im Wäscher zunächst durch zyklischen Einsatz aufkonzentriert, wobei dieses im weiteren Verlauf als Entnahmekquelle für das Nachfüllwasser der Quench dient. Auf diese Weise werden nach und nach die Schadstoffe ausgetragen, und das Rohgas [RhG] verlässt den gesamten Wäscherprozess als Reingas [RnG]. Für 1.000 m³ zu reinigendes Rohgas, das aus der Quench durch den Wäscher strömt, werden ca. 2,82 kg Natronlauge [NaOH] und 15 l enthärtetes Wasser [etW] eingesetzt, das vorab in Prozess 2.14 mittels Salz [NaCl] und Brauchwasser [BrW] hergestellt wurde. Darüber hinaus kommen 1.301 l Quenchwasser [QuW] aus der Quench, das mit dem zusätzlichen Wasser wieder dorthin zurückgepumpt wird (ca. 1.316 l). Das nun fast vollständig gereinigte Rauchgas verlässt den Prozess als Reingas [RnG] und strömt zum bereits beschriebenen Wärmeaustauscher (Prozess 2.12).

Das beim Quenchen ausgeschleuste Waschwasser [WaW] fließt dagegen in die Neutralisation. Da durch die Aufnahme vieler saurer Schadstoffe das Waschwasser einen extrem niedrigen pH-Wert (~1) aufweist, muss es für weitere Behandlungsschritte zunächst neutralisiert und anschließend alkalisiert werden, was Ziel der in Prozess 2.17 dargestellten Neutralisation ist. Dazu wird dem Waschwasser [WaW] in einem dreistufigen Prozess Kalkmilch [KaM] zugeführt, die ebenfalls in einem Vorlaufprozess 2.16 mittels Brauchwasser [BrW] und Kalk [Kalk] angerührt wurde. So werden für einen Liter alkalisiertes Waschwasser [WaW], das am Ende des 0,1-minütigen Prozesses einen pH-Wert von 11 aufweist, rund 0,85 l saures Waschwasser [WaW] und 0,15 l Kalkmilch [KaM] benötigt, wobei sich letztere – bezogen auf die Herstellung eines Liters – aus 0,3 kg Kalk [Kalk] und 0,9 l Brauchwasser [BrW] zusammensetzt.

Im Anschluss gelangt das alkalisierte Waschwasser in den Stripper, abgebildet als Prozess 2.19, dessen Ziel es ist, aus der Verbindung Ammoniak zurückzugewinnen. Dazu wird das Waschwasser [WaW] mit gesättigtem Prozessdampf [PrD] durchströmt, was dazu führt, dass sich das Ammoniak [NH₃] aus dem Wasser [WaW] löst und gasförmig abscheidet. Der Dampf wird anschließend kondensiert und das so flüssig gewordene Ammoniak zur bereits dargestellten Ammoniak-eindüsung (Prozess 2.4) weitergeleitet. Das verbleibende Waschwasser [WaW] fließt weiter zur ebenfalls bereits erläuterten Sprühtrocknung (Prozess 2.10). Im Hinblick auf die Einsatz- und Ausbringungsmengen werden pro Liter Waschwasser [WaW], das durch den Stripper läuft, 0,05 kg Prozessdampf [PrD] benötigt und damit 0,14 l Ammoniak [NH₃] gewonnen. Übrig bleiben 0,86 l des schadstoffbelasteten Waschwassers [WaW], das zur Sprühtrocknung weitergeleitet und dort verdampft wird. Da dort die Schadstoffe ausgetragen werden, schließt sich an dieser Stelle der interne (Schadstoff-)Kreislauf.

Unterdessen strömen die Reingase [RnG] nach dem Wärmetauscher (Prozess 2.12) zur letzten Reinigungsstufe, der als Prozess 2.18 dargestellten Schlauchfilterung. Um letzte Quecksilber- und Dioxinverbindungen herauszufiltern, wird ein Zusatzstoff (Dioxorb 714, [DXB]) eingedüst, der sich an den aufgehängten Filterschläuchen festsetzt und die genannten Verbindungen ab-

³⁴ Für eine umfassende Beschreibung der einzelnen Wäscherstufen vgl. Thomé-Kozmiensky 1994, S. 489.

sorbiert. Dabei werden die Schläuche periodisch abgeklopft und das so freigesetzte, aber bereits mit Schadstoffverbindungen behaftete Dioxorb [DXB] wieder vor die Schläuche eingebracht, um das Bindungsmaterial optimal auszunutzen. Ist eine vorbestimmte Schadstoffsättigung erreicht, wird das Dioxorb als Adsorbens [AdS] ausgeschleust und direkt in den Verbrennungsraum befördert (Prozess 2.5). Das Rauchgas, das nun sämtliche Reinigungsstufen durchlaufen hat und nur noch Schadstoffe in genehmigten Konzentrationen in sich trägt, wird als Abgas [AbG] über einen zweiten Saugzug zum Kamin befördert, wo es an die Umwelt abgegeben wird. Eine quantitative Betrachtung der beteiligten Objekte zeigt, dass für 1.000 m³ Reingas [RnG] durchschnittlich 1,93 kg Dioxorb [DXB] aufgewendet werden müssen und der Saugzug für die gleiche Menge Abgas [AbG] etwa 4,63 KW Strom [elS] verbraucht, wobei der finale Reinigungsprozess ca. 0,7 Minuten dauert.

Mit dem Ausstoß der Abgase ist der Müllverbrennungsprozess zunächst beendet. Wie aber festgestellt werden konnte, gehen mit der Verbrennung etliche Abprodukte (Schlacke, REA, Asche) einher, die zum Teil stark mit Schadstoffen belastet sind und einer weiteren Behandlung bedürfen. Hierum kümmern sich die Anlagenbetreiber in der Regel aber nicht mehr selbst, sondern sie überlassen diese Aufgabe privaten Spezialentsorgern, wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erwähnt. Aus diesem Grund werden für die Analyse alle weiterführenden Schritte ausgeklammert; folglich endet die Prozessbeschreibung der kommunalen Restmüllentsorgung an dieser Stelle.

3 Typologie der Entsorgungsprozesse

Um einen zweckmäßigen Vergleich der dargestellten Teilprozesse zu ermöglichen, soll im Folgenden eine entsorgungsspezifische Prozesstypologie entworfen werden. Die Einordnung der Prozesse in eine Systematik kann helfen, verwandte Prozessstrukturen aufzudecken und so z. B. gleichartige Planungsgegenstände zu identifizieren.

3.1 Konzeptionelle Vorüberlegungen

Die zu entwerfenden Typologien orientieren sich an bestehenden Systematiken zu (Produktions-) Prozessen und passen diese, sofern es zweckmäßig erscheint, an entsorgungsspezifische Besonderheiten an. Dabei wird neben einer Typologie, die relevante *technische* Merkmale der betrachtenden Prozesse beinhaltet, eine weitere, *entsorgungswirtschaftliche* Typologie dargestellt, die ökonomische Merkmale aufzeigt und somit einen Zugang zu betriebswirtschaftlichen Fragestellung auf Basis technischer Eigenschaften ermöglicht.³⁵ Die nachfolgende Herleitung beider Sys-

³⁵ DYCKHOFF hat eine ähnliche Typologie bereits hergeleitet, die speziell auf Reduktionsprozesse fokussiert, vgl. Dyckhoff 1996, Sp. 1463-1466. Die hier vorgenommene Systematisierung lehnt sich daran an, betrachtet aber insbesondere Entsorgungsprozesse und differenziert weiterführend nach technischen und ökonomischen Merkmalen.

tematiken erfolgt dabei schrittweise und ordnet zur Veranschaulichung die identifizierten Teilprozesse der Restmüllentsorgung beispielhaft zu.

Vorab sei darauf hingewiesen, dass eine Zuordnung aller zuvor identifizierten Prozesse nicht bzw. nicht immer zweifelsfrei möglich ist. So orientieren sich die in der Literatur vorzufinden Typologien stark an materiellen Sachgüterprozessen und lassen Transportprozesse, die keine materiellen Transformationen bedingen, aber ebenfalls „Produktionen“ sind, weitestgehend unberücksichtigt. Dies macht sich zum einen an Systematisierungskriterien fest, die kaum Bezug zu Transportprozessen aufweisen, und zum anderen an dem Umstand, dass bei derartigen Transferprozessen vielmehr die Planung und der Einsatz prozessdurchführender Potenzialfaktoren anstelle des zu transferierenden Leistungsguts im Vordergrund stehen.³⁶ Dies wird vor allem in Phasen der Vor- und Nachkombination deutlich, die zur Durchführung von Transportleistungen (als Hauptkombination) notwendig sind und u. a. dazu dienen, die Potenzialfaktoren in einen leistungsbereiten Zustand zu versetzen.³⁷ Trotz dieser Schwierigkeiten wird im Folgenden versucht, die Transportprozesse, soweit es sinnvoll erscheint, in die Typologiekategorien einzuordnen.

3.2 Produktionstechnische Typologie von Entsorgungsprozessen

Eine Entsorgungstypologie aus produktionstechnischer Sicht systematisiert die Prozesse vorrangig hinsichtlich des Reduktionsverfahrens. Tabelle 3-1 zeigt verschiedene Typologisierungsmerekmale und deren Ausprägungen im Überblick.

Hinsichtlich der (materiellen) **Wirkung auf den Abfall** lassen sich in Anlehnung an RIEBEL und SOUREN Abtrennungs-, Hinzufügungs-, Umformungs- und Umwandlungsprozesse unterscheiden.³⁸ Während bei Abtrennungs- und Hinzufügungsprozessen die stoffliche Gestalt der einzelnen Abfallkomponenten unverändert bleibt, bedingen Umformungsprozesse eine Änderung der (erkennbaren) Form der betrachteten Komponenten, wenngleich die Masse sowie materielle Eigenschaften unverändert bleiben. Umwandlungsprozesse zeichnen sich hingegen dadurch aus, dass die beteiligten Abfallkomponenten stoffliche Veränderungen erfahren, in deren Folge sich physikalische Eigenschaften der betroffenen Komponenten ändern (z. B. Temperatur, Druck) bzw. gänzlich neue, andersartige Objekte entstehen.³⁹

Zu beobachten sind Abtrennungs- und Hinzufügungsprozesse vor allem bei Prozessen, bei denen ein Restmüllumschlag stattfindet: So entspricht beispielsweise die Behälterbefüllung mit Abfall einer Hinzufügung, und folglich ist die Entleerung in das Sammelfahrzeug als Abtrennung des Mülls von der Tonne (und anschließende Hinzufügung zum Sammelfahrzeug) zu begreifen. Darüber hinaus ist auch der Vermischungsprozess im Müllbunker als Hinzufügung zu interpretie-

³⁶ Vgl. Isermann 1999, S. 80.

³⁷ Zu den Begriffen Vor-, Haupt- und Nachkombination im Zusammenhang mit Transportprozessen vgl. Isermann 1999, S. 72f.

³⁸ Vgl. Riebel 1963, S. 29ff., sowie Souren 1996b, S. 61.

³⁹ Vgl. Souren 1996b, S. 61.

ren, wie auch die Abscheidung der Schadstoffe aus dem Rauchgas an entsprechender Stelle einer Abtrennung entspricht.⁴⁰ Umformungsprozesse sind bei der Restmüllentsorgung hingegen nicht zu beobachten, während Umwandlungsprozesse z. B. bei der direkten Müllverbrennung (Brennstoffverbrennung zu Schlacke, Kesselasche und Rauchgas) auftreten.

Tabelle 3-1: Produktionstechnische Typologie von Entsorgungsprozessen
(in Anlehnung an RIEBEL 1963, DYCKHOFF 1996 und 2006 sowie SOUREN 1996b)

Entsorgungsprozessart	Transport			Behandlung			(Ab-)Lagerung	
Art der materiellen Veränderung (Behandlung)	Abtrennung		Hinzufügung		Umformung		Umwandlung	
Behandlungstechnologie	physikalisch			chemisch			biologisch	
Gestalt der Abfallobjekte	Fließgüter						Stückgüter	
	Schüttgüter	Flüssigkeiten	Gase	2- und 3-phasige Gemische	2-dimensional konstruktiv festgelegte endlose verschiedenförmige Güter		3-dimensional konstruktiv festgelegte Stücke/ Aggregate	
Gestalt der Ausbringungsobjekte	Fließgüter						Stückgüter	
	Schüttgüter	Flüssigkeiten	Gase	2- und 3-phasige Gemische	2-dimensional konstruktiv festgelegte endlose verschiedenförmige Güter		3-dimensional konstruktiv festgelegte Stücke/ Aggregate	
Rhythmus des Entsorgungsablaufs	kontinuierlich				diskontinuierlich			
Grad der Mechanisierung	Handarbeit	von Werkzeugen unterstützte Handarbeit	mit Muskelkraft angetriebene, manuell gesteuerte Maschinen	motorisierte manuell gesteuerte Maschinen	motorisierte Maschinen mit selbstständiger Steuerung einzelner Funktionen	motorisierte Maschinen mit selbstständiger Steuerung aller Funktionen		selbstständig gesteuerte, mechanisch integrierte Zwangslaufsysteme

⁴⁰ Hier wird eine Schwäche der graphischen Modellierung offenbar, da die Betrachtung der betroffenen Prozesse auf Grund neu entstehender oder abgewandelter Outputobjekte fälschlicherweise eine *Umwandlung* der Inputobjekte nahelegt. Abhilfe könnte z. B. eine qualitative Modellierung der Teilkomponenten schaffen, die SOUREN in Ansätzen schon vorgestellt hat und entsprechend weiterentwickelt werden könnte. Vgl. zur sog. Komponentenmodellierung Souren 1996a, Kapitel 6, und Souren 2002, Kapitel 10, sowie zusammenfassend Souren/Richter/Miofsky 2009, S. 7.

Hinsichtlich der **Technologie**, mit der die Prozesse durchgeführt werden, kann nach physikalischen, chemischen und biologischen Verfahren unterschieden werden.⁴¹ Physikalische Techniken beruhen dabei überwiegend auf mechanischen, elektrischen, magnetischen oder thermischen Wirkprinzipien und grenzen sich so gegenüber chemischen Verfahren ab, die allein auf stofflichen Reaktionen basieren.⁴² Werden Prozesse hingegen vorrangig mithilfe lebender Organismen (z. B. Bakterien) durchgeführt, sind diese den biologischen Verfahren zuzuordnen.⁴³ Indes ist die eindeutige Zuordnung einer singulären Verfahrenstechnologie zu einem der genannten Verfahrenstypen oftmals nur schwer möglich, da bei der Durchführung meist mehrere verschiedene Technologien angewendet werden. Ist allerdings die Angabe eines einzelnen Technologietyps erforderlich, sollte auf das Verfahren abgestellt werden, das für den Prozessverlauf maßgeblich ist.⁴⁴

Bei Betrachtung der Behandlungsprozesse der Restmüllentsorgung fällt auf, dass diese überwiegend chemischer Natur sind, da u. a. die Feuerung, aber auch die Reinigungsprozesse auf chemischen Reaktionen mit den eingesetzten Stoffen basieren. Lediglich der Abfallvermischungsprozess im Bunker der MVA ist physikalischer Art, da dieser allein mittels mechanischer Systeme (Greifarme) durchgeführt wird; ebenso basieren die Müllumschlagsprozesse auf der mechanischen Prozessausführung.

Ein weiteres relevantes Analysekriterium stellt die **Gestalt der Abfallobjekte** dar, da dies z. B. entscheidenden Einfluss auf die Tätigkeitsfolge oder den Materialfluss haben kann.⁴⁵ RIEBEL unterscheidet auf der einen Seite *Fließgüter*, zu denen Schüttgüter, Flüssigkeiten, Gase sowie (als Kombination) 2- und 3-phasige Gemische sowie 2-dimensionale „endlose“ Güter gezählt werden. Diese Objekte haben gemein, dass sie keine funktionelle Form besitzen und quasi beliebig teilbar sind.⁴⁶ Davon werden *Stückgüter* unterschieden, die eine festgelegte 3-dimensionale und funktionale Form aufweisen und somit nicht ohne Funktionsverlust geteilt werden können.⁴⁷

Bei der Abfalleinsammlung kommt als Abfallobjekt zunächst nur der Restmüll in Betracht. Eine eindeutige Zuordnung lässt sich indes nur schwer vornehmen, da es sich je nach Betrachtungstiefe entweder um ein Stückgut-Gemisch aus mehreren, verschiedenen Abfallfraktionen handelt, oder aber um ein einzelnes „Müllobjekt“ (Schüttgut), das dann als Fließobjekt keine qualitative Differenzierung erlaubt. Für Restmüllgemische genügt die Einordnung in letztere Kategorie, da bei der anschließend stattfindenden Abfallverbrennung eine differenzierte, qualitative Betrachtung von Restmüllkomponenten – im Gegensatz zu Sortierprozessen, die auf das Abtrennen einzelner Teilkomponenten abzielen – i. d. R. nicht stattfindet. Insofern können alle Komponenten als „gleichartig“ angenommen werden. Auch die Einsatzstoffe der Rauchgasreinigung und Dampferzeugung sind – wenngleich sie nicht als Abfallobjekt betrachtet werden können – eben-

⁴¹ Vgl. dazu auch im Folgenden Riebel 1963, S. 62-88.

⁴² Vgl. dazu ausführlich Riebel 1963 S. 65 und S. 76f.

⁴³ Vgl. zu den Abgrenzung der Technologien untereinander Riebel 1963, S. 63f.

⁴⁴ Ist dies auch nicht möglich, muss der Prozess verfeinert, d. h. tiefer gehend analysiert werden, wobei zweifelsfreie Technologiezuordnungen vermutlich erst auf Mikroebene möglich sind.

⁴⁵ Vgl. Große-Oetringhaus 1974, S. 123.

⁴⁶ Vgl. Riebel 1963, S. 49 u. S. 63.

⁴⁷ Vgl. Riebel 1963, S. 53.

falls unter die Fließgüter zu subsumieren, und weisen neben Schüttgütern (z. B. Dioxorb, Kalk, Salz, Aktivkohle) auch Flüssigkeiten (z. B. Heizöl, Brauch- und Speisewasser) und Gase (z. B. Frischluft) auf.

Auch die **Gestalt der Ausbringungsobjekte** stellt ein interessantes Analyse Kriterium dar. Die Differenzierung orientiert sich dabei an der bereits zuvor dargestellten Gliederung der Abfallobjekte in Fließ- und Stückgüter mit jeweiliger Unterteilung. In Bezug auf den Restmüllentsorgungsprozess können Schüttobjekte (z. B. Schlacke, Kesselasche), Flüssigkeiten (z. B. Ammoniak, Waschwasser, Quenchwasser) und Gase (z. B. Rauchgas, Frischdampf, Abgas) identifiziert werden, wobei zu beachten ist, dass diese Zuordnung auf Basis der Einzelbetrachtung der Prozesse erfolgt. Wird hingegen lediglich der Gesamtprozess mit seinen Verbindungen zur Umwelt betrachtet, so fällt auf, dass z. B. keinerlei Flüssigkeiten emittiert werden, da diese nur innerhalb der Anlage im Kreislauf geführt werden.

Im Hinblick auf den **Rhythmus des Entsorgungsablaufs** lassen sich kontinuierliche und diskontinuierliche Prozesse unterscheiden.⁴⁸ Während Erstere charakterisiert, dass „eine regelmäßige Unterbrechung aus verfahrensimmanenten Gründen nicht notwendig und üblich ist“⁴⁹, bedingen diskontinuierliche Prozesse eine oder mehrere Unterbrechungen im Produktionsablauf, die verfahrens- und/oder materialflussbedingte Ursachen haben können.⁵⁰ Diese lassen sich darüber hinaus in regelmäßige (rhythmische) und unregelmäßige Unterbrechungen unterscheiden.

Bei Gesamtbetrachtung der Restmülltransportprozesse ist beispielsweise die eigentliche Restmüllsammmlung als diskontinuierlich einzustufen, da das Abfahren der bereitgestellten Behälter aufgrund unterschiedlicher Teilstrecken zwischen den Behälterstandorten keinen kontinuierlichen (Abfuhr-)Rhythmus erkennen lässt. Gleiches gilt für die Bereitstellung der Behälter, die ebenfalls ein unterschiedlich langes „Ablaufen“ der Lader zwischen und innerhalb der Standorte erfordert. Letztlich lässt sich nach Ansicht der Autoren sogar verallgemeinert feststellen, dass sämtliche Transportprozesse im Grunde als diskontinuierlich einzuordnen sind, da bei umfassender Betrachtung derartiger Prozesse allein aufgrund des stets notwendigen Anfahrens und Abbremsens oder eines Geschwindigkeitswechsel selten dauerhaft kontinuierliche Bewegungsabläufe zu erkennen sind. Ein Beispiel für unregelmäßig unterbrechende Prozesse stellt die Beschickung des Verbrennungsrosts einer Müllverbrennungsanlage dar, die immer erst dann erfolgt, wenn der vorab aufgegebene Brennstoff ausreichend durchgebrannt ist. Aufgrund des ungleichmäßigen Durchsatzes, der u. a. vom Heizwert vorab aufgegebenen Mülls abhängig ist, differiert in der Folge das zeitliche Aufgabeintervall. Kontinuierliche Prozesse lassen sich hingegen insbesondere bei der Rauchgasreinigung identifizieren.

Das letzte produktionstechnisch interessante Merkmal ist der **Grad der Mechanisierung**, der aufzeigt, inwiefern Arbeitsschritte mithilfe maschineller Unterstützung durchgeführt werden. Dabei erscheinen die unterschiedlichen Mechanisierungsstufen unter dem Gesichtspunkt prozessualer (bzw. betriebswirtschaftlicher) Optimierungspotenziale interessant. Das Spektrum der

⁴⁸ Vgl. Riebel 1963, S. 89.

⁴⁹ Riebel 1963, S. 89.

⁵⁰ Vgl. Riebel 1963, S. 89-91.

Substitution menschlicher Verrichtungen durch Maschinen reicht dabei von Handarbeit, die ohne jegliche maschinelle Unterstützung durchgeführt wird, bis zu mechanisch vollkommen autonom gesteuerten Prozessabläufen.⁵¹

Bei der Entsorgung von Restmüll lassen sich überwiegend drei Ausprägungen erkennen: So gibt es Prozesse, die auf reiner Handarbeit beruhen (Bereit- und Zurückstellen der Behälter, Ein- und Ausstieg in das Sammelfahrzeug), oder manuell gesteuerte, motorisierte Maschinen nutzen, wie z. B. sämtliche Transportprozesse mit dem Sammelfahrzeug, die Umschlagsprozesse, die hydraulische Funktionalitäten (z. B. Greifarme) des Fahrzeuges benötigen, oder, im Bereich Behandlung, der anfängliche Mischungs- und Beschickungsprozess. Darüber hinaus laufen der Verbrennungsprozess und der gesamte Rauchgasreinigungsprozess überwiegend völlig automatisch ab, und sie benötigen nur dann einen manuellen Eingriff, wenn die Selbststeuerung nach Ansicht des Leitpersonals nicht mehr ausreicht, um auf eventuelle Fehler oder Grenzwertüberschreitungen zu reagieren.

3.3 Produktionswirtschaftliche Typologie von Entsorgungsprozessen

Um eine umfassende und strukturierte Analyse der modellierten Entsorgungsprozesse gewährleisten zu können und sie darüber hinaus betriebswirtschaftlichen Untersuchungen zugänglich zu machen, ist es zweckmäßig, die herausgestellten Prozesse auch hinsichtlich produktionswirtschaftlicher Merkmale zu charakterisieren. Die nachfolgende Tabelle 3-2 zeigt diesbezüglich produktionswirtschaftliche Typologisierungsmarkmale und ihre Ausprägungen im Überblick.

Tabelle 3-2: Produktionswirtschaftliche (Entsorgungs-)Prozesstypologie
(in Anlehnung an Dyckhoff 1996 und 2006)

Transformationstyp	materiell		raum-zeitlich		zeitlich	
Stufigkeit	einstufig		mehrstufig		zyklisch	
Technikform	determiniert		Verfahrenswahl		flexibel	
Struktur des Materialflusses	glatt	konvergierend	divergierend		umgruppierend	
Wiederholungsgrad	Einzelentsorgung		Serienentsorgung		Massenentsorgung	
Räumliche Anordnung der Produktivseinheiten	Werkstatt-entsorgung	Zentren-entsorgung	Fließ-entsorgung	Werkbank-entsorgung	Baustellen-entsorgung	

⁵¹ Vgl. dazu ausführlich Riebel 1963, S. 115-119.

Grundlegendes Klassifizierungsmerkmal ist zunächst die Unterscheidung nach dem (sehr eng mit dem produktionstechnischen Kriterium Entsorgungsprozessart verbundenen) **Transformations-typ**, der entweder materiell, raum-zeitlich oder nur zeitlich geprägt sein kann. Betrachtungsgegenstand der „klassischen“ Produktionstheorie sind in der Regel materielle Zustandstransformationen, bei denen Inputobjekte qualitativ und/oder quantitativ umgewandelt werden.⁵² Auch die Hinzufügung in ein oder die Abtrennung in mehrere Objekte kann als materielle Transformation verstanden werden.⁵³ Raum-Zeitliche Transformationen (Transportprozesse) hingegen bedingen den Transfer betrachteter Objekte zu einem anderen Ort, die materielle Gestalt bleibt davon jedoch unberührt. Gleiches gilt für rein zeitliche Transformationen (Lagerungen), die lediglich den Zeitpunkt der Verfügbarkeit eines Objektes verschieben; das Objekt befindet sich nach der Transformation folglich in einem nachfolgenden Zeitpunkt.

Die **Stufigkeit** der (Entsorgungs-)Technik⁵⁴ leitet sich von der Anzahl aufeinanderfolgender Prozessschritte bzw. Aktivitäten ab, die zur Entsorgung der Abfälle notwendig sind. Einstufige Techniken bestehen aus Aktivitäten, deren beteiligte Objektarten sich eindeutig als Input- oder Outputobjekte klassifizieren lassen.⁵⁵ Demgegenüber zeichnet mehrstufige Techniken aus, dass mindestens eine Outputobjektart einer Aktivität als Inputobjektart in eine andere Aktivität übergeht und somit eine Folge von Aktivitäten bildet.⁵⁶ Zyklische Prozesse weisen darüber hinaus die Besonderheit auf, dass mindestens eine Objektart eine bereits durchlaufende Aktivität erneut durchläuft und sich somit eine Prozessschleife herausbildet. Dabei ist eine Aussage über die Stufigkeit immer davon abhängig, wie tief gehend ein Prozess strukturell analysiert wird: Je tiefer das Untersuchungsniveau gewählt wird, desto mehr Stufen weist der Prozess auf et vice versa.

Im Ergebnis der Untersuchung bei dargestellter Beobachtungstiefe zeigt sich zunächst eine Mehrstufigkeit über alle Prozesse hinweg, die sogar beide Hauptprozesse Restmülleinsammlung und -verbrennung miteinander verbindet. Darüber hinaus durchläuft das Quenchwasser als Repetierfaktor in der Quench und dem Wäscher mehrere Zyklen, bis es (als Waschwasser) ausge-tragen wird, das letztlich in der Sprühtrocknung verdampft wird und somit ebenso einen Zyklus bildet. Zudem lassen sich zyklische Prozesse im erweiterten Sinne identifizieren, die auf dem Zyklus von Potenzialfaktoren basieren: Unter der Annahme grundsätzlich gleicher (aber ortsver-setzter) Prozessstrukturen sind so die Restmüllabfuhrprozesse Bereitstellen, Entleeren und Zu-rückstellen zyklisch, und zwar so lange, bis jeweils alle Behälter bearbeitet wurden. Teilprozesse, von denen keine Zyklen ausgehen, sind hingegen stets einstufig, z. B. (bei vorliegender Betrachtungstiefe) das Fahren in die Stadt oder zur MVA und jeweils zurück, oder das Mischen und Aufgeben des Brennstoffs.

⁵² Vgl. Dinkelbach/Rosenberg 2000, S. 4.

⁵³ Vgl. Souren 1996b, S. 61 oder auch Souren 2002, S. 208-210, wo allerdings auf die bedeutungsgleichen Begriffe „Bündelung“ und „Entbündelung“ abgestellt wird.

⁵⁴ Unter einer Technik im *produktionstheoretischem* Sinne wird die Menge aller in einem Produktions- bzw. Reduktionssystem realisierbaren Aktivitäten verstanden, vgl. Dyckhoff 2006, S. 56. Aktivitäten wiederum stellen *eine* konkrete Möglichkeit der Objektkombination (Input zu Output) dar, vgl. Fandel 2005, S. 36, und Dyckhoff 2006, S. 54f.

⁵⁵ Vgl. Dyckhoff 2006, S. 95.

⁵⁶ Vgl. Dyckhoff 2006, S. 102.

Ein weiteres Kriterium, mit dem sich speziell einstufige Techniken strukturell weiter präzisieren lassen, ist die **Technikform**. Dabei zeichnen sich determinierte Produktionen dadurch aus, dass bei Vorgabe der Outputquantitäten die effizienten Inputquantitäten fixiert werden (outputseitig determiniert) oder bei Vorgabe der Inputquantitäten nur eine effiziente Outputkombination möglich ist (inputseitig determiniert). Die Outputobjekte im ersten Fall bzw. die Inputobjekte im letzten Fall sind jeweils einer (Grund-) Aktivität eindeutig zugeordnet.⁵⁷ Techniken, die durch Verfahrenwahl gekennzeichnet sind, bietet sich dagegen die Möglichkeit, ein Objekt unter Nutzung gleicher Inputs mittels verschiedener effizienter Verfahren herzustellen (Verfahrenswahl bei der Herstellung eines Outputs) oder ein Objekt auf unterschiedliche Weise mittels verschiedener Aktivitäten zur Herstellung gleicher Outputs zu nutzen (Verfahrenswahl zur Nutzung eines Inputs).⁵⁸ Bei völlig flexiblen Produktionen kann letztlich jeder Input in jeden Output überführt werden. Auch wenn dieser Sonderfall für materielle Umwandlungsprozesse kaum vorstellbar ist,⁵⁹ können auf diese Weise doch zumindest spezielle Transportprozesse abgebildet werden.⁶⁰

Wie die dargestellte Prozessanalyse zeigt, lassen sich zumindest determinierte und Verfahrenswahl-Prozesse identifizieren. So haben im Bereich der Restmülleinsammlung z. B. die Auf- und Absteigeprozesse determinierten Charakter, da genau festgelegt ist, wie viele Lader das Fahrzeug besteigen bzw. entsprechend wieder verlassen. Schwieriger zu beurteilen sind die identifizierten zyklischen Prozesse. Während z. B. bei der Behälterleerung durch das Sammelfahrzeug theoretisch jeder einzelne Teilprozess für sich determiniert ist, kann der jeweils darauf folgende Teilprozess andere Restmüllquantitäten und Prozesszeiten aufweisen, und damit einen andersartigen Prozess begründen. Auf dieser Grundlage lässt sich zunächst eine flexible Struktur vermuten. Da aber die Abfolge der gesamten Tour (und somit die einzelnen Prozesse) vorab festgelegt ist und auch die Outputobjektarten immer die gleichen sind,⁶¹ ist der gesamte (als Zyklus modellierte) Prozess in seiner grundsätzlichen Struktur determiniert; wobei mit jeder Ausführung der (zyklischen) Teilprozesse die Input- und somit die Outputkoeffizienten wie auch die Prozesszeiten (in Grenzen) stochastisch schwanken.⁶² Prozesse mit Verfahrenswahl zur Herstellung eines Outputs stellen z. B. die Behälterbereitstellungsprozesse dar, da entweder ein Behälter (= Output) durch den Müllwerker im Vollservice oder durch den Überlassungspflichtigen im Teilservice bereitgestellt wird. Die gleiche Sichtweise greift bei der Behälterrückstellung, die dann aber eine Verfahrenswahl zur Nutzung eines Inputs darstellt.

⁵⁷ Vgl. Dyckhoff 2006, S. 97-99.

⁵⁸ Vgl. vertiefend Dyckhoff 2006, S. 97-100.

⁵⁹ SOUREN zeigt eine Ausnahme, in dem er (materielle) Sortierprozesse als Transportprozesse auf Mikroebene begreift und so einer Modellierung mittels flexibler Techniken zugänglich macht, vgl. Souren 2004, S. 134-136.

⁶⁰ Vgl. Dyckhoff 2006, S. 100.

⁶¹ Gäbe es Wahlmöglichkeiten bei den Transportrelationen, so ließe sich dies durch flexible Transportprozesse modellieren; vgl. allgemein zur Modellierung flexibler Transportprozesse Dyckhoff 2006, S. 100f. sowie Dyckhoff 1994, S. 234-237.

⁶² Gleichwohl kann dieser Sachverhalt der dargestellten Modellierung nicht entnommen werden – hier ist jeweils ein rein determinierter Prozess zu vermuten. Gelegentlich wurde die Stochastizität aber bei den Prozesszeiten durch Angabe von Zeitintervallen angedeutet, wie bspw. bei den Prozessen 1.5, 1.6 und 1.15 in Abbildung 2-3.

Im Bereich der Restmüllverwertung sind die Behandlungs- und Reinigungsprozesse (in Grenzen) flexibel, da allein die Brennstoffzusammensetzung mit jedem Durchlauf schwankt und das System darauf mit veränderten (angepassten) Betriebsmittelzufuhren reagiert – was jeweils einem eigenständigen Prozess entsprechen würde. Entscheidend bei der konkreten Beurteilung auf Basis der vorangegangenen Analyse ist allerdings die qualitative Beschreibung der Objekte. Je abstrakter die Objekte erfasst bzw. beschrieben werden, desto determinierter ist die Prozessstruktur, da sich weniger Handlungsmöglichkeiten ergeben. So geht die vorliegende Analyse gar nur von einer konkreten Input-Zusammensetzung des Brennstoffs aus, die folglich einen determinierten Reinigungsprozess nach sich zieht. Gelegentlich kann aber auch eine Verfahrenswahl zur Nutzung eines Inputs beobachtet werden: So geht z. B. das Objekt „Frischdampf“ nach seiner Erzeugung in drei verschiedene Prozesse ein (Prozessdampferzeugung, Eigenstromerzeugung und Dampfweiterleitung). Ebenso unterliegen die aus dem Frischdampf eigens erzeugten Zwischenprodukte einer Verfahrenswahl zur Nutzung eines Inputs (Prozessdampf: Speisewarmerwärmung, Ammoniakendüngung, Luftvorwärmung, Stripper; elektrischer Strom: Elektrofilter, Wärmetauscher, Schlauchfilterung). Darüber hinaus erweckt das in Abbildung 2-9 modellierte Abprodukt „REA“ den Anschein, dass es durch zwei Prozesse entsteht (Sprühtrocknung und Elektrofilterung) und damit einer Verfahrenswahl zur Herstellung eines Outputs entsprechen würde. Da in den Prozessen aber jeweils unterschiedliche REA-Komponenten abgeschieden werden, stellt dies keine echte Verfahrenswahl, sondern eine determinierte Produktion zweier Outputobjekte dar.

Im Hinblick auf die **Struktur des Materialflusses** elementarer (einstufiger) Techniken⁶³ können glatte, konvergierende, divergierende oder umgruppierende Formen unterschieden werden. Maßgeblich ist das quantitative Verhältnis der Input- zu den Outputobjektarten. Während glatte Strukturtypen jeweils ein Input- und ein Outputobjekt vorweisen (1:1), bringen konvergierende Prozesse aus mehreren Einsatzobjekten ein Ausbringungsobjekt hervor (m:1) bzw. entstehen bei divergierenden Transformationen mehrere Outputobjekte aus einem Inputobjekt (1:n). Umgruppierende Materialflüsse sind hingegen durch jeweils mehrere beteiligte Input- und Outputobjektarten gekennzeichnet (m:n).⁶⁴

Bezogen auf die Restmüllentsorgung sind sämtliche Abtrennungsprozesse (z. B. Abstieg der Lader, Abtrennung einzelner Schadstofffraktionen) als divergierend und Hinzufügungsprozesse (z. B. Laderaufstieg, Brennstoffmischung, Kalkmilchaufbereitung, Neutralisierung sowie die verbrennungs- und dampferzeugungsvorbereiteten Prozesse wie Luftvorwärmung, Ammoniakendüngung und Speisewasservorwärmung) als konvergierend einzustufen. Transportprozesse sowie z. B. die Prozesse „Lagerung“, „Beschickung“, „Speisewassereinleitung“ und „Dampfweiterleitung“ sind aufgrund gleicher In- und Outputobjektarten den glatten Materialflüssen zuzuordnen. Die restlichen Prozesse wie z. B. Umschlagsprozesse oder andere materielle Umwandlungsprozesse sind dagegen den umgruppierenden Materialflüssen zuzuordnen.

⁶³ Eine elementare Technik besteht annahmegemäß aus lediglich einem einzigen Prozess und kann als Sonderfall einstufiger Techniken angesehen werden (vgl. Dyckhoff 2006, S. 92 und S. 95).

⁶⁴ Vgl. Dyckhoff 2006, S. 93f.

Der **Wiederholungsgrad** der Entsorgung, der in Einzel-, Serien- oder Massenentsorgung unterschieden werden kann, gibt an, wie viele Redukte⁶⁵ gleicher Art mithilfe eines festgelegten Prozesses entsorgt bzw. behandelt werden. So bedingen Einzelentsorgungen in der Regel individuell gestaltete Entsorgungsprozesse, die folglich mit jedem neuen Redukt andersartig ablaufen. Bei Serienentsorgungen werden kleine, aber begrenzte Lose gleichartiger Redukte entsorgt, und Massenentsorgungen sind durch die zunächst unbegrenzte Entsorgung/Behandlung nahezu gleichartiger Abfälle gekennzeichnet.⁶⁶

Wenngleich sich Transportprozesse in dieses Schema nur bedingt sinnvoll einordnen lassen, könnten bei Betrachtung der Teilprozesse der Restmüllsammmlung die Bereit- und Zurückstellung sowie der jeweilige Umschlag auf das Fahrzeug zunächst als Massenentsorgung gekennzeichnet werden.⁶⁷ Diese Zuordnung kann damit begründet werden, dass jeweils nur eine Abfallart (Restmüll) entleert bzw. umgeschlagen wird, wobei die unterschiedlichen Behältergrößen der Einordnung nicht im Wege stehen, da allein auf das Redukt abgestellt wird. Anders würde die Einordnung erfolgen, wenn (wie oftmals auch tatsächlich durchgeführt, hier aber nicht modelliert) nach der Restmülleinsammlung eine weitere Abfallart (z. B. Biomüll) abgefahren würde. Dies würde dann einer Serienentsorgung entsprechen, da dazu ggf. Umrüstprozesse stattfinden müssen. Diskussionswürdig ist darüber hinaus, ob erkennbare Prozesse der Vorkombination wie z. B. die Auf- und Abstiegsprozesse der Lader oder die Fahrt in die Stadt von diesem Schema erfasst werden können und wenn ja, wie diese konkret einzuordnen sind. Aufgrund der jeweilig einmaligen Ausführung im gesamten Prozessverlauf müssten sie folgerichtig als Einzelentsorgung gekennzeichnet werden, ebenso die Fahrt zur Müllverbrennungsanlage (als Hauptkombination) oder zurück zum Betriebshof (als Nachkombination).

Während die Transportprozesse nur schwierig gemäß dieses auf Sachgüterproduktion ausgerichteten Kriteriums einzuordnen sind, ist die Müllverbrennung eindeutig der Massenentsorgung zuzuordnen, da der ständige Hauptzweck der Anlage darin besteht, lediglich das eingesetzte (Rest-)Müllgemisch im Volumen zu reduzieren und reaktionsunfähig zu machen.⁶⁸ Da dies ohne Wechsel im Behandlungsablauf (d. h. die Anlage kann und wird nicht für andere Hauptzwecke genutzt) nahezu pausenlos stattfindet, kann zwangsläufig nur diese Einordnung zweckmäßig sein.⁶⁹

Eng mit dem Wiederholungsgrad verbunden ist letztlich die Unterscheidung der Prozesse nach **der räumlichen Anordnung der Produktiveinheiten**. Unterschieden werden dabei hauptsächlich die Werkstatt-, Zentren-, Fließ-, Werkbank- und die Baustellenentsorgung.⁷⁰ Erstere Anordnungsmöglichkeit ist dadurch gekennzeichnet, dass Maschinen gleicher Art räumlich zusam-

⁶⁵ Vgl. zum Begriff Redukt Dyckhoff 2006, S. 126ff.

⁶⁶ Vgl. dazu Günther/Tempelmeier 2005, S. 58f., sowie Dyckhoff 2006, S. 363.

⁶⁷ Vgl. ergänzend zur Massenentsorgung als analoger Typus zum Post- und Paketdienst Schaut/Souren 2010, S.42-44.

⁶⁸ Vgl. Bilitewski/Härdtle/Marek 2000, S. 221.

⁶⁹ Anders wäre das, wenn mehrere Müllarten (z. B. verschiedene Sondermüllarten) abwechselnd verbrannt werden; vgl. das Beispiel bei Dyckhoff 2006, S. 325-329.

⁷⁰ Vgl. Dyckhoff 2006, S. 363.

mengefasst werden,⁷¹ Produktiveinheiten gleicher Funktion stehen folglich zusammen (Funktionsprinzip). Bei der Zentrenentsorgung wird ein Großteil der (unterschiedlichen) Maschinen, die zur Bearbeitung eines Objektes notwendig sind, räumlich zusammengebracht; die Ausrichtung orientiert sich somit am Werkstück (Objektprinzip). Sind die Maschinen zudem so hintereinander angeordnet, dass ein durchgängiger Materialfluss möglich ist, wird von Fließentsorgung gesprochen.⁷² Ähnlich der Zentrenentsorgung, die allerdings weitestgehend automatisiert verläuft, stehen bei der Werkbankentsorgung sämtliche Arbeitsmittel auf engem Raum direkt zur Verfügung und ermöglichen die (manuelle) Objektbearbeitung an einem Ort.⁷³ Hauptmerkmal der Baustellenentsorgung ist darüber hinaus, dass die benötigten Potenzialfaktoren erst zum Ort des Arbeitsobjekts, der meist außerhalb der Produktionshallen liegt, transportiert werden müssen und der Entsorgungsprozess gewissermaßen „extern“ durchgeführt wird.⁷⁴

Erneut erscheint es diskussionswürdig, Transportprozesse, insbesondere der Restmüllentsorgung, in diese Systematik einzuordnen. Sie könnten dann der Zentrenentsorgung zugeordnet werden, da die zur Transferdurchführung notwendigen Potenzialfaktoren (i. d. R. das Transportfahrzeug und der Fahrer) an einen (wenn auch flexiblen) Ortspunkt zusammengebracht sind und nur dann die Durchführung der raum-zeitlichen Aktivität unmittelbar möglich ist – unabhängig davon, ob ein Repetierfaktor transportiert wird oder nicht (wie im Falle der Vorkombination). Darüber hinaus entspricht der Umschlag wie auch das Bereit- und Zurückstellen der Behälter einer Baustellenentsorgung, da die dazu benötigten Potenzialfaktoren (Lader, Restmüllbehälter) zum Ort der Restmüllbehälter gebracht und die entsprechenden Prozesse dort (extern) verrichtet werden. Die Restmüllverbrennung mit anschließender Rauchgasreinigung kann dagegen der für Massenentsorgung typischen Fließbandentsorgung zugeordnet werden. So „fließt“ der Brennstoff nach der Aufgabe den Rost hinab; anschließend durchströmt das Rauchgas die nacheinander angeordneten Reinigungsstufen und verlässt am Ende als gereinigtes Abgas den Prozess.

4 Resümee

Als Ausgangspunkt des DFG-Forschungsprojektes „Wertschöpfungstheorie betrieblicher Entsorgungsprozesse“ dient der vorliegende Arbeitsbericht der Untersuchung und Darstellung realer Entsorgungsprozesse für Restmüll mithilfe von Input/Output-Graphen und deren Einordnung in eine Entsorgungsprozesssystematik.

Dazu wurden auf Basis realer Erhebungen zunächst die zwei Hauptentsorgungsprozesse (*Sammlung und Transport*, *Thermische Behandlung*) in Teilprozesse zerlegt und getrennt voneinander hinsichtlich der beteiligten Transformationen, Objekte und Akteure analysiert. Dabei zeigte sich beim Sammlungs- und Transportprozess, dass vor allem Potenzialfaktoren im Fokus des Interesses stehen (Lader, Sammelfahrzeug, Mülltonnen), bei denen überwiegend die Dauer der Pro-

⁷¹ Vgl. Günther/Tempelmeier 2005, S. 14.

⁷² Vgl. Dyckhoff 2006, S. 363.

⁷³ Vgl. Dyckhoff/Spengler 2005, S. 26.

⁷⁴ Vgl. Günther/Tempelmeier 2005, S. 20f.

zessbeteiligung interessiert. Darüber hinaus wurden eine Reihe zyklischer Prozesse (i. w. S.) aufgedeckt (Behälterbereit- und -zurückstellung, Restmüllumschlag auf Sammelfahrzeug), die mittels eingeführter Prozessweiche auch durch Input/Output-Graphen dargestellt werden konnten.

Bei den Prozessen der thermischen Verwertung standen hingegen vermehrt Repetierfaktoren im Fokus der Analyse. Es fällt auf, dass der eigentliche Restmüll-Verbrennungsprozess nur einen kleinen Teil der Prozesskette ausmacht und vielmehr die anschließende Rauchgasreinigung im Fokus der Betreiber steht, da die hervorgerufenen Abgase in die direkte Umgebung abgegeben werden. Auch hier konnten verschiedene Zyklen (i. e. S) identifiziert werden, die allerdings nicht (wie zuvor) die Potenzial-, sondern die Repetierfaktoren betrafen, wie. z. B. das Quench- oder Waschwasser.

Nach der Prozessbeschreibung wurde eine produktionstechnische und eine produktionswirtschaftliche Systematik entworfen, die sich an bisherigen Systematisierungsversuchen für Produktionsprozesse anlehnte und zweckmäßige Merkmale auf Entsorgungsprozesse übertrug. Aus technischer Sicht wurde dabei u. a. auf die Entsorgungsprozessart, die Art der materiellen Veränderung, die Behandlungstechnologie oder den Rhythmus des Entsorgungsablaufs Bezug genommen. Aus produktionswirtschaftlicher Sicht wurde bspw. auf den Transformationstyp, die Technikform oder die räumliche Anordnung der Produktiveinheiten als Systematisierungsmerkmal abgestellt. Passend dazu wurden die identifizierten Teilprozesse zugeordnet. Neben einigen weniger überraschenden Ergebnissen (Sammlung und Transport besteht überwiegend aus Transportprozessen, die thermischer Verwertung überwiegend aus Behandlungsprozessen) konnte herausgestellt werden, dass die Transportprozesse im Hinblick auf den Entsorgungsablauf einen eher diskontinuierlichen Charakter aufweisen. Hingegen weist die thermische Verwertung einen kontinuierlichen Prozessablauf auf, deren Behandlungsprozesse überwiegend auf chemischen Reaktionen basieren. Interessantestes produktionswirtschaftliches Merkmal ist der Massenentsorgungscharakter, von dem überwiegend der gesamte Entsorgungsprozess (Sammlung und Behandlung) geprägt ist.

Beim Versuch, die Entsorgungsprozesse in die Produktionssystematiken einzuteilen wurde allerdings deutlich, dass sich die Systematiken sehr stark an materiellen Veränderungen anlehnen und somit einige Prozessarten – insbesondere die logistischen Prozesse – nicht immer zweifelsfrei zugeordnet werden konnten. So ist z. B. fraglich, ob ein Wiederholungsgrad oder die räumliche Anordnung der Produktiveinheiten gemäß dargelegter Systematik Typologisierungsmkmale von Transportprozessen darstellen.

Wenn auch bewusst in diesem Bericht kaum explizit herausgestellt, ließen sich zudem viele Prozess- und Objektinformationen mithilfe der dargelegten Input/Output-Analyse nicht oder nur wenig aussagekräftig abbilden. So konnten qualitative Objektinformationen (z. B. die Inhaltsstoffe der Rauchgase bei der Müllverbrennung oder der Füllungsgrad des Sammelfahrzeugs) kaum oder nur sehr eingeschränkt dargestellt werden. Das wurde insbesondere bei der Rauchgasreinigung deutlich, wo z. B. die Abtrennung einzelner Schadstoffkomponenten nicht explizit modelliert werden konnte. Darüber hinaus wurden zwar die Akteurssphären angedeutet, Transakti-

onsprozesse sowie Akteurspräferenzen bzgl. Transformationen und Transaktionen blieben dagegen vollständig außen vor.

Deshalb soll diesem Bericht zunächst eine umfassende Auflistung der Modellierungsdefizite folgen, die einer umfänglichen Erweiterung der Produktionstheorie hin zu einem entscheidungsorientierten Ansatz im Wege stehen. Parallel dazu sollen auch sämtliche Anspruchsgruppen und deren Bedürfnisse an die Entsorgungsbetriebe erfasst und der Versuch unternommen werden, diese in möglichst einfache Kennzahlen zu übersetzen.

Gelingt es dann, diese Kennzahlen mit den erhobenen Prozessen zu verknüpfen, kann daraus ein prozessbasiertes Kennzahlensystem entworfen werden, dass unter Berücksichtigung der hier bereits grob dargestellten quantitativen sowie qualitativen Transformationsbeziehungen als Basis für OR-Modelle dient, die eine Optimierung der realen Entsorgungsprozesse unterstützen.

Anhang A1

Anhang A2

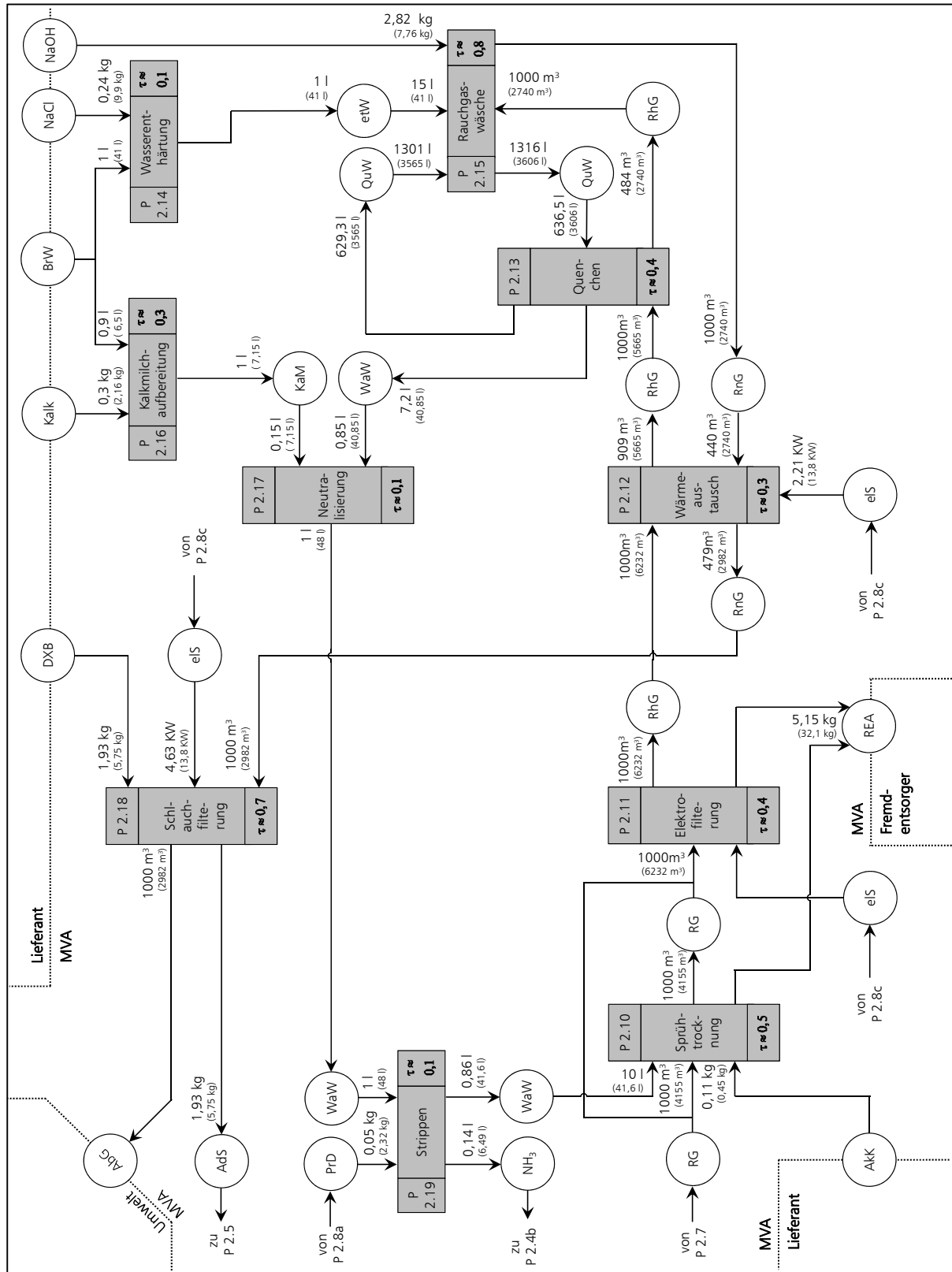


Abbildung A-2: Rauchgasreinigung (vergrößerte Darstellung)

Literaturverzeichnis

- Bilitewski, B./Härdtle, G./Marek, K.: Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre, 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2000.
- Corsten, H./Gössinger, R.: Dienstleistungsmanagement, 5. Aufl., München 2007.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft: Geförderte Projekte der DFG, <http://gepris.dfg.de/gepris/OCTOPUS/?jsessionid=ADFA2B3A9DA906CA8B4953B4F0B71962;jsessionid=ADFA2B3A9DA906CA8B4953B4F0B71962?module=gepris&task=showDetail&context=projekt&id=180575841>, Abrufdatum: 06.10.2011.
- Dinkelbach, W./Rosenberg, O.: Erfolgs- und umweltorientierte Produktionstheorie, 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2000.
- Dirks, E.: Praxishandbuch Abfallverbrennung: Technik und Betrieb thermischer Abfallbehandlungsanlagen, Emden 2000.
- Dyckhoff, H.: Betriebliche Produktion – Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft, 2. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo 1994.
- Dyckhoff, H.: Produktion und Reduktion, in: Kern, W./Schröder, H.-H./Weber, J. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, Stuttgart 1996, Sp. 1458-1468.
- Dyckhoff, H.: Produktionstheorie – Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft, 5. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2006.
- Dyckhoff, H./Spengler, T.: Produktionswirtschaft: Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure, Berlin/Heidelberg/New York 2005.
- Fandel, G.: Produktion I: Produktions- und Kostentheorie, 6. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2005.
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG), in der Fassung vom 11.08.2009, BGBl. I 2009, S. 2723, erstmalig veröffentlicht am 27.09.1994, BGBl. I 1994, S. 2705.
- Große-Oetringhaus, W. F.: Fertigungstypologie unter dem Gesichtspunkt der Fertigungsablaufplanung, Berlin 1974.
- Günther, H.-O./Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik, 6. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York 2005.
- Isermann, H.: Produktionstheoretische Fundierung logistischer Prozesse, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Ergänzungsheft 4/99, 1999, S. 67-87.

- Müller-Merbach, H.: Die Konstruktion von Input-Output-Modellen, in: Bergner, H. (Hrsg.): Planung und Rechnungswesen in der Betriebswirtschaft. Festgabe für Gert v. Kortzfleisch zum 60. Geburtstag, Berlin 1981, S. 19-113.
- Riebel, P.: Industrielle Erzeugungsverfahren in betriebswirtschaftlicher Sicht, Wiesbaden 1963.
- Rück, H. R. G.: Dienstleistungen in der ökonomischen Theorie, Wiesbaden 2000.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Umweltgutachten 2008, Berlin 2008.
- Satzung über die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen im Gebiet der Stadt Aachen (Abfallwirtschaftssatzung der Stadt Aachen), in der Fassung des 1. Nachtrages vom 17.11.2010.
- Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV), in der Fassung vom 27.01.2009, BGBl. I 2009, S. 129 der neu verfassten Bekanntmachung vom 14.08.2003, BGBl. I 2003, S. 1633.
- Schaut, T./Souren, R.: Der Blick über den Tellerrand – Was können kommunale Abfallwirtschaftsbetriebe von Logistikdienstleistern lernen?, in: Obladen, H. P./Meetz, M.: Betriebswirtschaftliche Strategien für die Abfallwirtschaft und Stadtreinigung, Kassel 2010, S. 37-50.
- Souren, R.: Theorie betrieblicher Reduktion: Grundlagen, Modellierung, Optimierungsansätze, Heidelberg 1996a.
- Souren, R.: Produktionswirtschaftliche Aspekte betrieblicher Entsorgungsprozesse, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft (56), Ergänzungsheft Nr. 2, 1996b, S. 53-77.
- Souren, R.: Konsumgüterverpackungen in der Kreislaufwirtschaft: Stoffströme – Transformationsprozesse – Transaktionsbeziehungen, Wiesbaden 2002.
- Souren, R.: Ein Kreislaufmodell als Analyserahmen einer transformations- und transaktionsorientierten Umweltwirtschaft, in: Zabel, H.-U. (Hrsg.): Theoretische Grundlagen und Ansätze einer nachhaltigen Umweltwirtschaft, Halle 2003, S. 93-110.
- Souren, R.: Material Flow Analysis in Closed Loop Supply Chains: Modelling of Packaging Waste Recycling at Different Hierarchical Levels, in: International Journal of Integrated Supply Management (1) 2004, No. 2, pp. 117-138.
- Souren, R./Richter, M./Miofsky, D.: Eignung graphischer Produktionsmodelle zur strukturellen Darstellung komplexer Dienstleistungen: Analyse eines erweiterten aktivitätsanalytischen Modellierungskonzepts am Beispiel von Bestattungsdienstleistungen, Ilmenauer Schriften zur Betriebswirtschaftslehre, Nr. 3/09, Ilmenau 2009.

Spengler, T.: Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte: Betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomisch effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten, Berlin 1994.

Thomé-Kozmiensky, K. J.: Thermische Abfallbehandlung, 2. Aufl., Berlin 1994.

Toth, Z.: Kennzahlen zur Unterstützung der Planung und Optimierung der Entsorgungslogistik, Rostock 2007.



Ilmenauer Schriften zur Betriebswirtschaftslehre

**Institut für Betriebswirtschaftslehre der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Technischen Universität Ilmenau**

www.tu-ilmenau.de/is-ww

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Norbert Bach
Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Gernot Brähler
PD Dr. rer. pol. David Müller
Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Rainer Souren

ISSN 2192-4643

ISBN 978-3-940882-35-6

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011200579](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011200579)

www.tu-ilmenau.de